

# 外観検査のための光沢物体表面の 幾何学的・光学的特性の獲得

大森 涼平<sup>1,a)</sup> 川原 僚<sup>2,b)</sup> 岡部 孝弘<sup>2,c)</sup>

**概要:** 本稿では、形状未知の光沢物体の外観検査のために、物体表面上の各点において法線・表面粗さ・反射率を推定する手法を提案する。一般に、光沢物体の幾何学的・光学的モデリングのためには、様々な光源方向・視線方向で撮影した大量の画像が必要になる。提案手法では、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効率的に画像を撮影する。また、偏光に基づいて鏡面反射成分を抽出して、抽出された輝度に対して反射モデルを当てはめることで、法線・表面粗さ・反射率を画素ごとに推定する。特に、反射モデルの線形化やノイズの伝播解析により、頑健な推定を実現するとともに、推定の信頼度を評価する。表面に起伏のある物体を対象として、実画像と合成画像を用いた実験を行い、提案手法の有効性を示す。

## 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。目視により行われる外観検査では、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様々な問題が存在する。これらの諸問題の解決に、外観検査の自動化は重要な課題である。

検査物体の表面に異常があると、その部分では周囲と比較して表面粗さは異なる。このことから、外観検査の手がかりとして表面粗さを用いることができる。この表面粗さを推定するため、本稿では鏡面反射光に着目する。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拡がる。この性質を利用し、鏡面反射光の拡がりや計測することにより、物体の表面粗さを測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は、従来より様々なものが提案されている。古典的な手法としては、複数枚の画像から物体の形状と表面粗さやBRDFを推定するSolomonらの手法[1]やGeorghiadisの手法[2]があるが、これらの手法は一般的な表面粗さやBRDFを仮定しているため、外観検査には用いることができない。

外観検査に応用できる手法として、画素ごとに表面粗さ

を推定するGhoshらの手法[3]やAriedaらの手法[4]がある。Ghoshらは偏光2次球面勾配照明パターンを用いて、物体表面の各点ごとの表面粗さを推定する手法を提案した。しかし、この手法には特殊な光源装置が必要になるという問題点がある。また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、Ariedaらの手法を拡張し、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。さらに、提案手法により推定されたパラメータが正しく推定できているかどうかを評価するために推定の信頼度を算出する。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や表現したTorrance-Sparrowモデル[5]がある。入射光と出射光の角度が深いこと、および物体は不透

<sup>1</sup> 九州工業大学大学院 情報工学府 情報創成工学専攻  
<sup>2</sup> 九州工業大学大学院 情報工学研究院 知能情報工学研究系  
a) oomori.ryohei383@mail.kyutech.jp  
b) rkawahara@ai.kyutech.ac.jp  
c) okabe@ai.kyutech.ac.jp

明の光沢物体であることを仮定すると、Torrance-Sparrow モデルは、

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

と簡略化した式で表すことができる。ここで、 $i$  は鏡面反射成分の輝度値、 $k$  は鏡面反射率、 $\mathbf{n}$  は物体の法線、 $\mathbf{v}$  は視線方向、 $\beta$  は光源方向  $\mathbf{l}$  と視線方向  $\mathbf{v}$  の二等分方向と法線方向  $\mathbf{n}$  のなす角、 $\sigma$  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、 $\mathbf{v}$  と  $\mathbf{l}$  は幾何学的較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。本稿では、式 (1) の簡略化したモデルを、物体が従う鏡面反射モデルとして用いる。

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 [6] 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、物体の鏡面反射が簡略化した 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  $\mathbf{n}, \sigma, k$  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。提案手法で用いる初期値の算出方法について次節以降で述べる。

## 2.1 法線の初期値

鏡面反射光は、正反射方向で最も強く観測されるという性質がある。この性質を利用し、輝度値が最大となるときの光源方向と視線方向の二等分方向を求めることにより、法線方向を求める。しかし、提案手法では、光源としてチェッカーパターンの1つのブロックを白色とした画像を投影したディスプレイを用いるため、光源位置は離散的なものになる。そのため、鏡面反射画像の輝度値が最大となるときでも、必ずしも正反射方向の関係になっているとは限らない。そこで、輝度値が大きい上位4つの光源方向を、輝度値を重みとした重み付き平均を行うことにより光源方向を求め、求めた光源方向と視線方向を二等分する方向を求めることにより法線方向の初期値を求める。

## 2.2 表面粗さと鏡面反射率の初期値

$p$  番目の光源で照らした物体を撮影し、鏡面反射成分を抽出することによって得られる鏡面反射画像の輝度値  $i_p$  は、平均0、分散  $s^2$  のガウスノイズ  $\delta_p (\ll i_p)$  が含まれていると仮定し、

$$i_p = \frac{k}{\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}} e^{-\frac{\beta^2}{\sigma^2}} + \delta_p \quad (2)$$

と表すことができる。この式を整理すると、

$$\delta_p = i_p \left[ \ln((\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) i_p) - \ln k + \beta_p^2 \left( \frac{1}{\sigma^2} \right) \right] \quad (3)$$

となる。ここで、 $\delta_p$  は平均0、分散  $s^2$  のガウス分布をもつので、最尤推定により

$$\min_p \sum_p i_p^2 \left[ \ln((\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) i_p) - \ln k + \beta_p^2 \left( \frac{1}{\sigma^2} \right) \right]^2 \quad (4)$$

で表される式を得ることができる。提案手法では、式 (4) の  $\ln k$  と  $1/\sigma$  を変数、 $i_p$  を重みとみなし、重み付き線形最小二乗法により式 (4) を満たす  $\sigma$  と  $k$  を求め、それらを初期値として用いる。

## 2.3 非線形最小二乗法

前節までで求めた初期値を用いて非線形最小二乗法による推定を行う。しかし、重み付き線形最小二乗法により求めた初期値にはノイズの影響が残ってしまっており、その影響により誤った解に収束してしまう可能性がある。そこで、式 (1) の鏡面反射モデルの未知のパラメータのうち、 $\mathbf{n}$  を既知とし、ノイズの影響が大きい  $\sigma$  と  $k$  のみを非線形最小二乗法により一度求める。その後、求めた  $\sigma$  と  $k$  および、既知とした  $\mathbf{n}$  を初期値として、再び非線形最小二乗法を行うことにより、最終的な推定結果を得る。

## 2.4 信頼度の評価

提案手法は外観検査で用いられることを目的としている。そのため、提案手法で推定した表面粗さが周囲と比較して大きく異なる場合、それが本当に周囲と異なる表面粗さとなっているのか、撮影条件が悪いために正しく推定できていないのかを調べることは重要である。そこで、推定結果の信頼度を評価する方法を提案する。

法線  $\mathbf{n}$  が既知であるとき、式 (1) の両辺に対数をとって整理した式

$$\ln[(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) i] = \ln k + \beta^2 \left( -\frac{1}{\sigma^2} \right) \quad (5)$$

の左辺の観測値は、横軸を  $\beta^2$ 、縦軸を  $\ln[(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}) i]$  とする2次元平面において、傾きが  $-1/\sigma^2$ 、切片が  $\ln k$  の直線上に分布する。提案手法では、この直線を、観測データの中からランダムに選択した2点からあてはめることを繰り返して、直線の近傍にあるデータの数が最も多い直線を最終的な結果とする、RANSAC[7]によりあてはめる。RANSACにより得られた直線の近傍にあるデータの数、すなわちインライア点の数を信頼度とした。

## 3. 実験

提案手法の有効性を確認するため、CG 実験および形状が未知である光沢物体を用いた実画像実験を行った。実画像実験は、図1に示す実験装置により行った。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

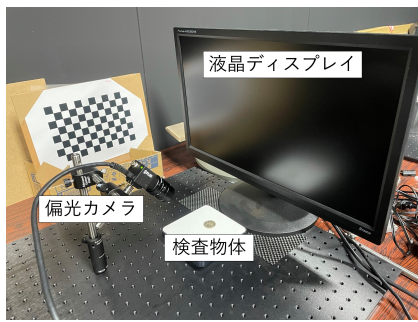
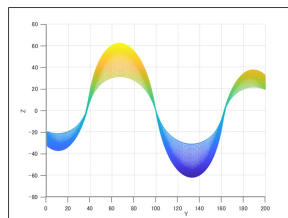
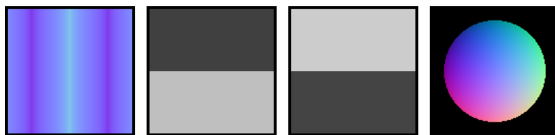


図 1 実験装置の配置



(a) 物体の形状



(b) 法線 (c) 表面粗さ (d) 鏡面反射率 (e) 球の法線

図 2 検査物体の形状と真値

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像を差し引くダーク補正を行った。また、合成画像実験では、図 1 と同じ位置情報を使用した。

### 3.1 合成画像実験

表面粗さと鏡面反射率が領域によって異なる波型物体を対象に合成画像実験を行い、法線と表面粗さ、鏡面反射率の推定を行った。合成画像実験では、Torrance-Sparrow モデルである式 (1) により得られる鏡面反射光に、ランダムなガウスノイズを加えた画像を撮影画像として推定に使用した。ガウスノイズの標準偏差は、16 ビットの画素値 65535 に対して、0% (ノイズなし)、1% (655.35)、2% (1310.7)、4% (2621.4) とした。実験に用いた物体の形状と法線、表面粗さ、鏡面反射率の真値、可視化で用いた法線と色の対応を示すための球の法線マップを図 2 に示す。

ノイズが 0% の画像から、提案手法によりパラメータを推定した結果を図 3(a), (b), (c)、提案手法の 2 回目の非線形最小二乗法を行わずに推定した結果を図 3(d), (e), (f)、重み付き線形最小二乗法により得られる初期値を使用せず、ランダムな初期値で推定した結果を図 3(g), (h), (i) に示す。同様に、ノイズが 4% の画像からパラメータを推定した結果を図 4 に示す。また、ノイズが 0% の画像からパラメータを推定した結果の平均推定誤差を図 5、ノイズが 4% の画像からパラメータを推定した結果の平均推定誤差を図 6 にそれぞれ示す。

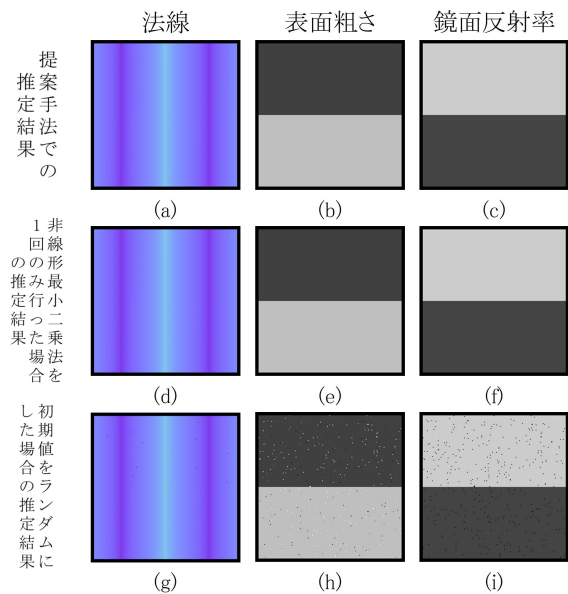


図 3 ノイズが 0% の場合の推定結果

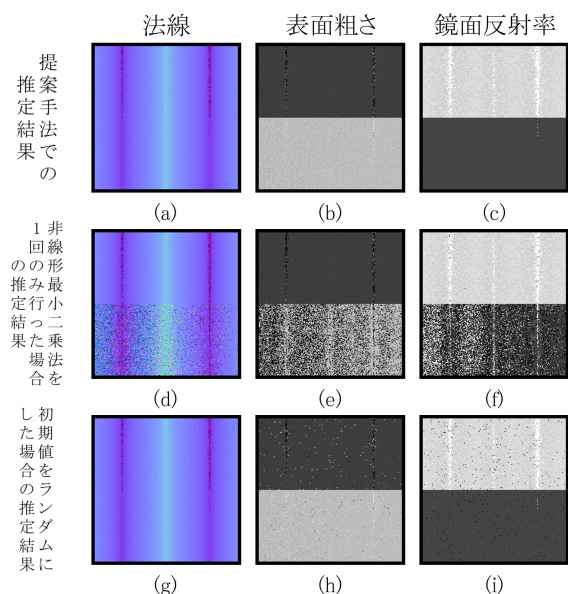


図 4 ノイズが 4% の場合の推定結果

図 3, 4, 5, 6 より、ノイズが 0% の場合、すなわちノイズを付加しない場合は提案手法と非線形最小二乗法を 1 回のみ行う手法の推定結果の間にほとんど差はみられない。一方、ノイズが 4% の場合は、提案手法は非線形最小二乗法を 1 回のみ行う手法よりも、定性的に良好に推定できていることが分かる。また、提案手法と初期値をランダムにして推定した場合の結果を比較すると、初期値がランダムの場合、付加したノイズの割合に関わらず推定結果にざらつきが生じている。したがって、提案手法のほうが定性的に良好な推定結果が得られているといえる。

次に、ノイズが 0%, 1%, 2%, 4% のときの、法線、表面粗さおよび鏡面反射率それぞれの平均推定誤差をプロットしたグラフを図 7 に示す。図 7 より、全てのパラメータにおいて付加したノイズの割合に関わらず、提案手法での推定誤差が最も小さくなっていることが分かる。このことから、提案手法の定量的な有効性が示された。

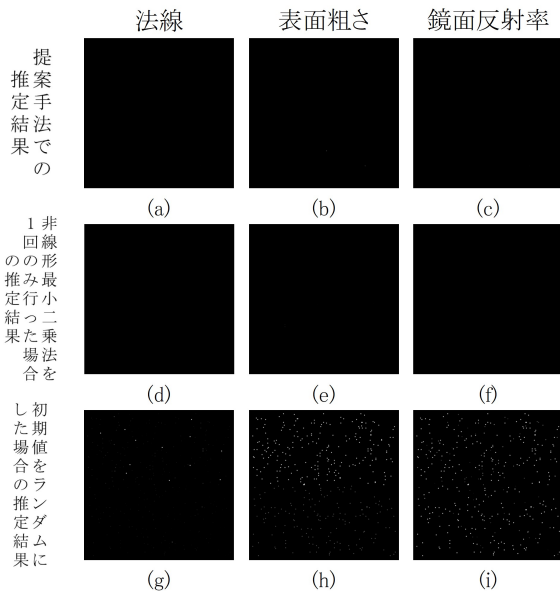


図 5 ノイズが 0% の場合の推定誤差

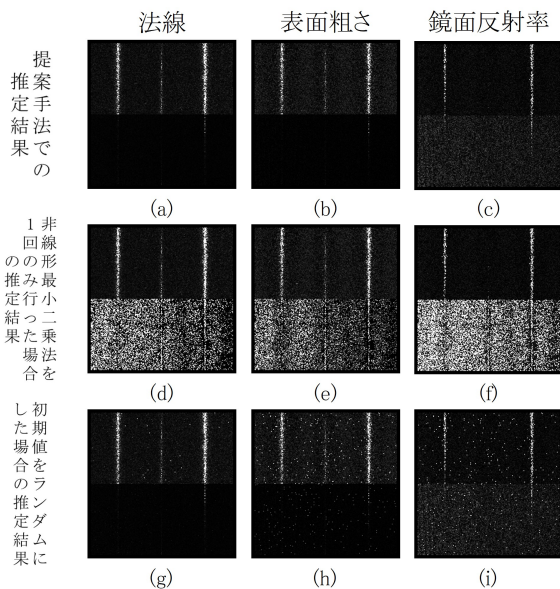
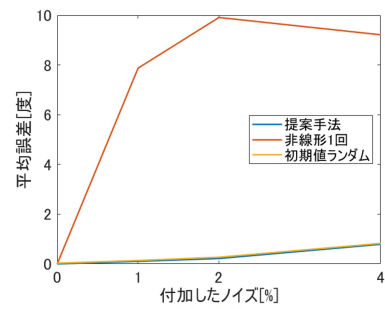
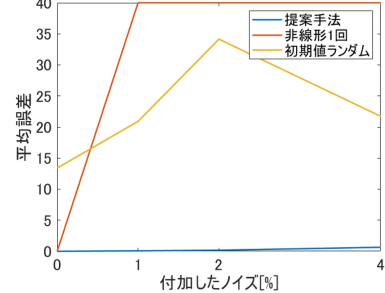


図 6 ノイズが 4% の場合の推定誤差

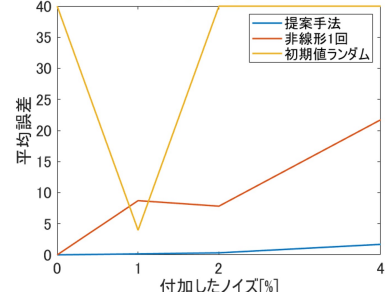
ここで、図 4(b) に着目すると、表面粗さが周囲と異なっている部分がある。このような部分が正しく推定できているかを調べるために信頼度を算出した。表面粗さが周囲とほとんど同じ点  $[x, y] = [550, 645]$  と、表面粗さが周囲と大きく異なる点  $[x, y] = [517, 673]$  における、ディスプレイ上の各光源位置における輝度値のグラフと、インライア点の数が 144 のときに画素値が 255 となるように可視化した信頼度の画像を図 8 に示す。図 8(b) より、 $[x, y] = [550, 645]$  では、ディスプレイ中央に輝度値のピークがあり、輝度値の分布がはっきりと分かるため、推定の信頼度は高いと考えられる。一方で、図 8(e) より、 $[x, y] = [517, 673]$  では、ディスプレイの端に輝度値のピークがあり、それが本当のピークなのかなどといったことが分からないため、推定の信頼度は低いと考えられる。図 8(c), (f) より、 $[x, y] = [550, 645]$  よりも、 $[x, y] = [517, 673]$  のほうが信頼度は低いという予想通りの結果が得られており、信頼度が



(a) 法線



(b) 表面粗さ



(c) 鏡面反射率

図 7 パラメータごとの平均推定誤差

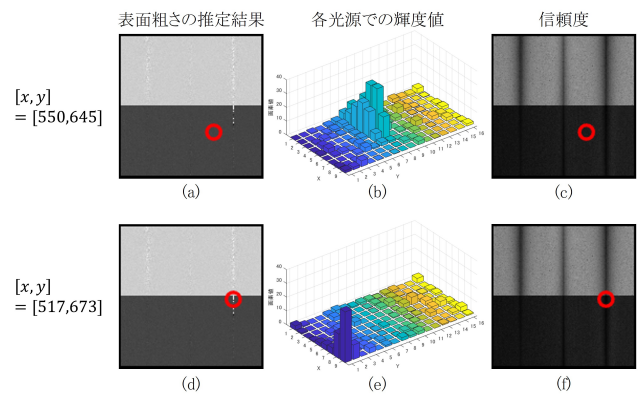


図 8 各光源の輝度値と信頼度

予期した通りのふるまいをしていることが確認された。

### 3.2 実画像実験

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 9 に示す。図 9(a) の、汚れの少ない硬貨の提案手法での推定結果を図 10(a), (b), (c), 提案手法の 2 回目の非線形最小二乗法を行わずに推定した結果を図 10(d), (e), (f), 重み付き線形最小二乗法により得られる初期値を使用せず、ランダムな初期値で推定した結果を図 10(g), (h), (i) に、ランダムな初期値で 10 回推定した際の推定結



図 9 検査物体

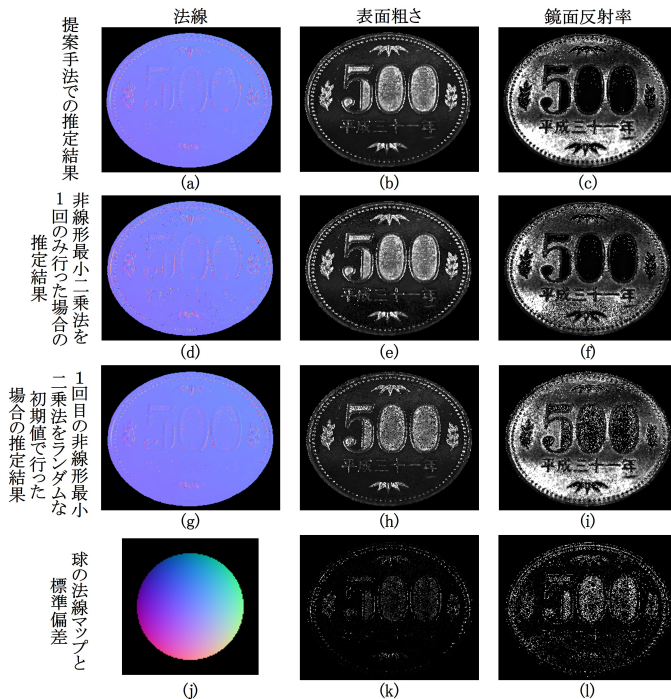


図 10 汚れの少ない硬貨の推定結果



図 11 汚れの少ない硬貨の信頼度

果の標準偏差を図 10(k), (l) に示す。また、図 9(b) の、汚れの多い硬貨の推定結果を図 12 に示す。図 10 と図 12 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 10(j) に示す。

図 10(a) に着目すると、500 円硬貨の起伏がない部分では法線が z 軸上向きになっているほか、文字や図形のふちの部分では法線の向きが変化していることから、法線に関して定性的に良好な推定結果が得られているといえる。また、500 円硬貨は、文字の内部や図形に凹凸が多くあるため、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 10(b), (c) に着目すると、文字の内部や図形のある部分では、起伏のない部分と比較して表面粗さは大きく、鏡面反射率は小さいという予想通りの結果が得られており、表面粗さおよび鏡面反射率についても定性的に良好に推定できている。

次に、図 10(a), (b), (c) および (d), (e), (f) より、非線形最小二乗法を行う回数による推定結果の違いを比較す

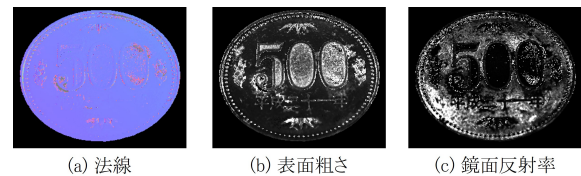


図 12 汚れの多い硬貨の推定結果

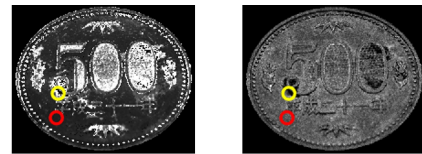


図 13 汚れの多い硬貨の信頼度

る。表面粗さについては図 10(b) と (e) でほとんど差はないが、図 10(a) と (d) および (c) と (f) にそれぞれ着目すると、非線形最小二乗法を 1 回のみ行った場合、起伏のない部分において法線と鏡面反射率の推定結果にざらつきが生じている。このことから、非線形最小二乗法を 2 回行う提案手法のほうが実画像においても有効であるといえる。

また、図 10(a), (b), (c) および (g), (h), (i) より、初期値による推定結果の違いを比較する。図 10(a), (g) に着目すると、法線についてはいずれの場合も同じ初期値を使用しているため、推定結果に差はほとんどない。一方、図 10(b), (h) および (c), (i) を比較すると、初期値をランダムにして推定した場合、提案手法での推定結果と比較して、文字の内部や図形のある部分で、表面粗さは大きく、鏡面反射率は小さい結果が出ている。このことから、重み付き線形最小二乗法により求まる初期値を使用して推定する提案手法のほうが実画像においても有効である。

図 10(b) に着目すると、「年」の文字の下側に、周囲と異なる表面粗さとなっている部分がある。そのため、推定結果の信頼度を算出した。表面粗さが周囲とほとんど同じ点  $[x, y] = [576, 660]$  と、表面粗さが周囲と大きく異なる点  $[x, y] = [576, 700]$  における信頼度を、インライア点の数が 48 のときに画素値が 255 となるように可視化した画像を図 11 に示す。図 11 の、赤色の丸は  $[x, y] = [576, 660]$ 、黄色の丸は  $[x, y] = [576, 700]$  をそれぞれ示している。図 11(b) より、いずれの点も周囲とほとんど同じ信頼度であることから、おおむね正しく推定できていると考えられる。したがって、点  $[x, y] = [576, 700]$  付近は表面粗さが周囲と異なる、すなわち表面に傷や汚れがあるといえる。

最後に、図 10 の (a), (b), (c) と図 12 より、物体の汚れ具合による推定結果を比較する。図 12 の結果に着目すると、汚れのない部分の推定結果は、図 10 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。

また、汚れの有無により信頼度に差があるかを調べるため、推定結果の信頼度を算出した。表面に汚れがほとんどない点  $[x, y] = [575, 540]$  と、表面に汚れが多くある点  $[x, y] = [535, 543]$  における信頼度を、インライア点の数が

48 のときに画素値が 255 となるように可視化した画像を図 13 に示す. 図 13 の, 赤色の丸は  $[x, y] = [575, 540]$ , 黄色の丸は  $[x, y] = [535, 543]$  をそれぞれ示している. 図 13(b) より, 汚れがある点では, 汚れがない点と比較して信頼度は低くなっている. このことから, 汚れのある部分では, 鏡面反射成分がうまく観測されなかったことにより, 正しく推定できていないことが分かる. 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. おわりに

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, 鏡面反射率を推定し, 推定の信頼度を評価する手法を提案した. また, 合成画像実験および実画像実験を通して提案手法の有効性を確認した.

今後の課題として, 照明条件の工夫による計測時間の短縮や, 拡散反射成分の併用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] F. Solomon and K. Ikeuchi, “Extracting the Shape and Roughness of Specular Lobe Objects Using Four Light Photometric Stereo”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.18, Issue 4, pp.449-454, 1996.
- [2] A. S. Georgiades, “Recovering 3-D Shape and Reflectance From a Small Number of Photographs”, In Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2003, pp.230-240, 2003.
- [3] A. Ghosh, T. Chen, P. Peers, C. A. Wilson and P. Debevec, “Estimating Specular Roughness and Anisotropy from Second Order Spherical Gradient Illumination”, In Proc. Eurographics Symposium on Rendering 2009, Vol.28, No.4, 2009.
- [4] K. Arieda and T. Okabe, “Illumination Planning for Measuring Per-Pixel Surface Roughness”, In Proc. MVA2021, P2-13, 2021.
- [5] 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
- [6] 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”, SSII2018 予稿集, IS1-34, 2018.
- [7] M. A. Fischler and R. C. Bolles, “Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”, Communications of the ACM, Vol.24, No.6, pp.381-395, 1981.