

外観検査のための半透明物体の表面粗さ推定

有枝 航汰 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。外観検査の対象には、合成樹脂製の工業製品などの半透明物体が含まれる。そこで本稿では、半透明物体表面の異常を検査するため、物体表面上の各点において表面粗さを計測する手法を提案する。

一般に、平滑面上で正反射する鏡面反射光は、表面上に微小な凹凸があれば正反射方向周りの様々な方向に反射する。この表面の微小な凹凸の程度、つまり表面粗さで変化する鏡面反射の正反射方向周りへの拡がりを観測し鏡面反射モデルに当てはめることによって表面粗さを推定することができる。

物体表面上の各点で粗さを推定するためには、物体の各点で正反射方向周りの鏡面反射光を観測する必要がある。多数の光源あるいは視点から撮影した大量の画像が必要である。光源やカメラ、および、物体の機械的な回転・並進により鏡面反射を様々な方向で観測することができるが、このような方法には機械的な回転・並進に要する時間や位置ずれの問題がある。また、半透明物体表面で観測される光には鏡面反射光以外に、表面付近での散乱により生じる拡散反射光、および、物体内部に透過し散乱を繰り返すことにより生じる表面下散乱光が存在する。これらの光は観測輝度に鏡面反射モデルをあてはめる際に外れ値となる。

そこで提案手法では、ディスプレイ上に線状のパターンを表示して物体に照射することで、光源とカメラ、検査物体を回転させずに様々な照明角度で物体表面の反射成分を効率良く観測する。また、拡散反射や表面下散乱による光は非偏光であるに対して、鏡面反射が偏光状態を維持することから [1]、偏光に基づいて半透明物体表面上の鏡面反射成分を抽出する。

2 提案手法

提案手法では、偏光光源としてディスプレイを利用し、このディスプレイ上に白線を上から下に順に表示させ、物体表面上の各点に様々な方向から入射する光を実現する。そして、半透明な物体表面上で反射する光を偏光カメラ（撮像素子上に4方向の偏光板を取り付けたカメラ）で観測し得られる鏡面反射光を利用して、鏡面反射モデルである Torrance-Sparrow モデル [2] 中の粗さパラメータを推定する。カメラが物体表面上の各点において反射光を観測する提案手法の概要図

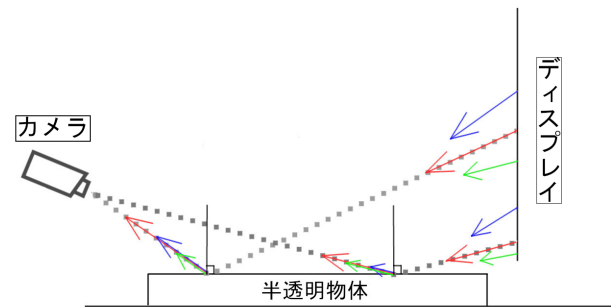


図 1: 提案手法の概要図

を図 1 に表す。

半透明物体を撮影した画像には鏡面反射と拡散反射、表面下散乱による光を含むため、偏光を用いて鏡面反射成分の抽出を行う。入射光が直線偏光のときに、偏光カメラで撮影した画像から計算できる最大輝度を $I_{\max}$ 、最小輝度を $I_{\min}$ とすると、鏡面反射光の強度 I_s は

$$I_s = I_{\max} - I_{\min} \quad (1)$$

となる [1]。

また、簡略化した Torrance-Sparrow モデル [2] の鏡面反射光の強度は視点方向を $\mathbf{V}$ 、物体法線を $\mathbf{N}$ 、鏡面反射率を K_s とすると、

$$I_s = \frac{K_s}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}} e^{-\frac{\beta^2}{\sigma^2}} \quad (2)$$

と表現される。 β は光源方向と視点方向の二等分方向 $\mathbf{H}$ と物体法線のなす角度である。また、(2) 式は

$$\ln(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}) I_s = \ln K_s - \frac{\beta^2}{\sigma^2} \quad (3)$$

のように変形できる。

検査対象である半透明物体と偏光カメラ、ディスプレイの3つの幾何学的関係を較正し、光源方向と法線、および、視線方向を画素ごとに求める。

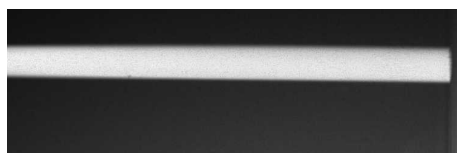
各画素において、ディスプレイ中の光源位置によって変化する β の値と対応する輝度値 I_s が得られる。提案手法では、線形最小二乗法を用いて式 (3) に当てはめることで、粗さパラメータ σ の値を求める。

3 実験

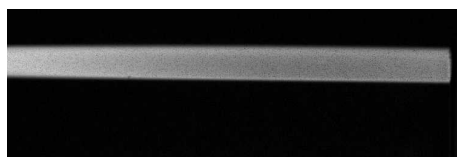
機械的な回転・並進の不要な効率的な鏡面反射の観察、および、偏光に基づく鏡面反射成分の抽出という提案手法の動作確認をするために図 2 のプロトタイプを作成して実験を行った。



図 2: 実験装置の配置様子



(a) 複数の反射成分を含む画像



(b) 鏡面反射成分を抽出した画像

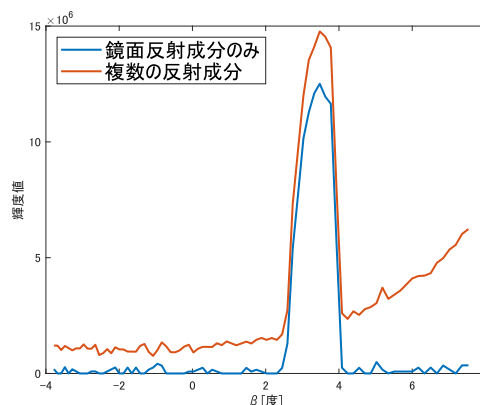
図 3: 磨りガラスの撮影画像

ディスプレイ上に幅5ピクセルの白線を上から順に表示させ、白線の位置が表示されるごとに検査対象の表面上の様子を偏光カメラで撮影した。この実験では、偏光カメラに LUCID 社製 VP-PHX050S-P を使用した。また、ディスプレイの解像度は 1228×1024 である。

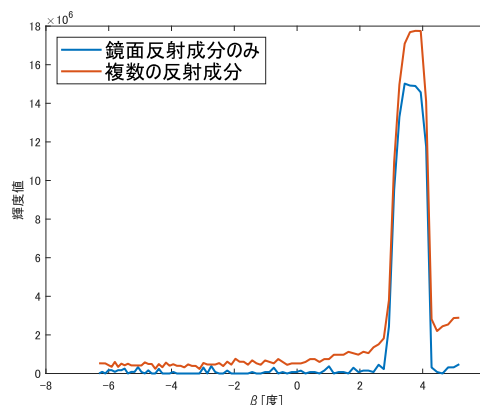
図2の実験環境下で磨りガラスを撮影し、ディスプレイの白線以外の光によるオフセットを取り除いた。白線による拡散反射光と表面下散乱による光、鏡面反射光を含んだ画像を図3(a)、鏡面反射光のみを抽出した画像を図3(b)に示す。次に、ある画素に注目したときに光源方向をかえたときの画素値を図4に示す。図4(a)は図3中の $(X, Y) = (250, 400)$ を選択し、図4(b)は図3中の $(125, 100)$ を選択した。また、図4中の赤線は反射成分分離前の反射光の強度であり、青線は抽出し鏡面反射光 I_s である。

観測した輝度値のピーク位置が $\beta = 0$ になるようにシフトした後で、図4中の曲線をそれぞれを線形最小二乗法を用いて式(3)の関数に当てはめて粗さパラメータの推定を行った。図4(a)の複数の反射成分が含まれる場合は $\sigma_{250,400,r}=0.0156$ となり鏡面反射成分を抽出した場合は $\sigma_{250,400,b}=0.0947$ となった。図4(b)の複数の反射成分が含まれる場合は $\sigma_{125,100,r}=0.0109$ となり鏡面反射成分を抽出した場合は $\sigma_{125,100,b}=0.0348$ となった。

粗さが一般的な物体表面において、反射成分を抽出する前は推定した粗さの値の差は大きいですが、鏡面反射成分を抽出することで粗さの値の差は小さくなった。



(a) 画素位置 (250, 400)



(b) 画素位置 (125, 100)

図 4: 選択した画素の反射光分布

4 むすび

本手法では光源やカメラ、検査物体を機械的に動かすことなく、画素ごとに効率良く粗さ推定を行う手法を提案した。また、偏光の性質を利用して鏡面反射成分を抽出することで、半透明物体特有の反射光の影響を減らして表面粗さを頑健に推定した。さらに、偏光カメラとディスプレイからなるプロトタイプを作成して、提案手法の動作を確認した。

光源の光量を増やすことや、線状のパターンを工夫することによる計測時間の短縮は今後の課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP18H05011, および、JP17H01766 の助成を受けた。

参考文献

- [1] L.B. Wolff and T.E. Boulton, "Constraining object features using a polarization reflectance model", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.13, No.7, pp.149-155, 1991
- [2] K. Torrance and E. Sparrow, "Theory for off-specular reflection from roughened surfaces", Journal of the Optical Society of America, Vol.57, pp.1104-1114, 1967