偏光プログラマブル照明による半透明物体の表面粗さ推定

有枝 航汰1 岡部 孝弘2

概要:本稿では、半透明物体の外観検査の自動化のために、物体表面上の各点において表面粗さを推定す る手法を提案する.一般に、鏡面反射光の正反射方向付近の強度分布を手掛かりにして各点の表面粗さを 推定するには、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.また、半透明物体におい ては、鏡面反射光だけでなく、表面下散乱光も同時に観察される.そこで提案手法では、液晶ディスプレ イに表示した線状パターンを照明とすることで、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.また、反射・散乱に伴う偏光状態の変化に着目して、鏡面反射光を頑健に抽出する.実画 像を用いた実験により、提案手法の有効性を示す.

キーワード:外観検査,自動化,半透明物体,表面粗さ,偏光

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は,一般的であ るものの,手間や人為ミスによる検査のばらつきなどの問 題がある.また,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も存在する.そこで本稿では,外観検 査の自動化を目的として,半透明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.したがって,鏡面反射光の正反射方向周りの拡がりの 程度を計測することで,表面の微小な凹凸,すなわち表面 粗さを推定することができる.

物体表面上の各点で表面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 り,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,被写体の機械的な回転・ 並進により鏡面反射を様々な方向で観測する手法 [5]があ るが,このような方法には機械的な回転・並進に要する時 間や位置合わせの精度の問題がある.一方で,これら三つ を固定する手法 [3][4]では,物体表面全体,あるいは,領 域ごとに表面粗さが一様であると仮定して推定を行ってお り,物体表面の各点において表面粗さを計測することはで きない.

また、半透明物体表面で観測される光には鏡面反射光の

他に,表面層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,鏡面反射光の拡がりを 評価するうえで外乱となる.

そこで提案手法では、偏光プログラマブル照明,つまり, 液晶ディスプレイ上に表示した線状パターンを照明とする ことで、光源とカメラ、対象物体を回転させずに物体表面 上の各点を様々な角度から効率的に照明する.また、拡散 反射や表面下散乱による光は非偏光であるのに対して、鏡 面反射が偏光状態を維持することから[1],半透明物体表面 上の鏡面反射成分を偏光に基づいて抽出する.

実験では,液晶ディスプレイと偏光カメラからなる撮影 環境を構築して,実際の半透明物体の表面粗さを推定する. 特に,液晶ディスプレイを照明とする効率的な撮影,なら びに,偏光に基づく鏡面反射成分抽出の有効性を示す.

2. 提案手法

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, このディスプレイ上に水平な線状パターンを上から下 に順に表示させ,物体表面上の各点を様々な方向から照ら す光源を実現する.そして,検査対象の半透明物体を偏光 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) で観測して鏡面反射光の抽出を行う.この鏡面反射光の輝 度値を用いて,鏡面反射モデルである Torrance-Sparrow モデル[2]の表面粗さパラメータを推定する.液晶ディス プレイ,対象物体,および,偏光カメラからなる撮影環境 の概念図を図1に表す.

半透明物体を撮影した画像は鏡面反射成分と拡散反射成

¹ 九州工業大学大学院情報工学府先端情報工学専攻

² 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

カメラ



図2 実際の撮影環境



抽出できていることが分かる.

また、アクリル板表面上のある点において観測された輝 度値とβの関係を図4に示す.図4より鏡面反射成分・拡 散反射成分・表面下散乱成分が混在するときの輝度を示す 赤色の曲線では $\hat{\sigma}_r = 0.821$,鏡面反射成分のみの輝度を示 す青色の曲線では $\hat{\sigma}_b = 0.803$ となり、拡散反射成分や表 面下散乱光によるオフセットの影響で最大値が大きくなる ため ô の値がやや大きくなってしまうことが分かる.オフ セットの影響は、表面粗さ $\hat{\sigma}$ が大きい物体に対して、より 顕著であると考えられる.

次に,図3(b)中のように被写体表面上の各点において鏡 面反射成分を用いて求めた δ から作成したヒストグラムを 図5に示す.図5より ôの値がほぼ1点に集中しているこ とが分かる.検査対象のアクリル板は表面粗さがほぼ一様 であると考えられることから、定性的には、提案手法がう まく働いていることが分かる.

さらに, $\hat{\sigma}(x,y)$ に対する勾配の大きさを表した濃淡画像 を図6に示す。この図6は勾配の大きさの最大値が輝度値 255 になるように全体を定数倍している.図6から画像中 央付近などに表面粗さの異なる画素があると分かる.

4. おわりに

本手法では光源やカメラ,対象物体を機械的に動かすこ となく、画素ごとに効率良く表面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、半透明物体で生じる拡散反射光と表面下散乱 光を除去して表面粗さを頑健に推定した. さらに、均一な 表面粗さと考えられる対象物体の表面粗さ推定を行うこ とで提案手法の動作を確認した. 光源の光量を増やすこと や、照明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.

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 Imax, 最小輝度

を *I*_{min} とすると,鏡面反射光の強度 *I*_s は

 $I_{\rm s} = I_{\rm max} - I_{\rm min}$ (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 V,物体表面の法線を N,鏡面 反射率を Ks とすると,

半透明物体

図1 撮影環境の概念図

分,表面下散乱成分を含むため,偏光を用いて鏡面反射成

$$I_{\rm s} = \frac{K_{\rm s}}{\boldsymbol{N} \cdot \boldsymbol{V}} e^{-\frac{\beta^2}{2\sigma^2}} \tag{2}$$

と表現される. β は光源方向と視点方向の二等分方向 h と 法線のなす角度, σは鏡面反射光のピークの鋭さを表すパ ラメータである.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てβを得る.提 案手法では,式(1)のσに相当するものとして,角度βに対 して鏡面反射光の強度をプロットしたときの半値全幅 ô を 用いて表面粗さを評価する.なお、 $\hat{\sigma} = 2\sigma\sqrt{2\ln 2} \simeq 2.35\sigma$ の関係が成り立つ.

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の有効性を確認 するとともに、本手法による表面粗さ推定の有効性を示す ために図2のような実験環境を整え実験を行った.

ディスプレイ上に幅5ピクセルの水平で白色の線状パ ターン(以下、白線と呼ぶ)を上から順に表示させ, 白線 が表示されるごとに検査対象物体を模した平らなアクリル 板を偏光カメラで撮影した.この実験では,FLIR 社製の 偏光カメラ(BFS-U3-51S5P-C)を使用した. また, ディ スプレイの解像度は 1228×1024 である.

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 き, 白線による拡散反射光と表面下散乱による光, および, 鏡面反射光を含んだ画像を図 3(a) に示す. さらに, 偏光を 利用して図 3(a) から鏡面反射光のみを抽出した画像を図 3(b) に示す. 図3より定性的に白線による鏡面反射成分を

IPSJ SIG Technical Report





図 6 ôの勾配の大きさを表す濃淡画像

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

- L. Wolff and T. Boult. 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 Socity of Americaa*, Vol.57, pp.1104-1114, 1967.
- [3] S. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade. Determining shape and reflectance of hybrid surface by photometric sampling.

- [4] D. Goldman, B. Curless, A. Hertzmann and S. Seitz, Shape and Spatially-Varying BRDFs from Photometric Stereo, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.32, No.6, pp.1060-1071, 2010.
- [5] J. Filip, R. Vavra, M. Haindl, P. Zid, M. Krupicka, and V. Havran. BRDF Slices: Accurate Adaptive Anisotropic Appearance Acquisition. In *Proc. CVPR2013*, pp.1468-1473, 2013.