

微粒子を含む加飾フィルムの表面下構造解析

池本 祥¹ 向川 康博² 松下 康之³ 八木 康史¹

1. 概要

これまで、コンピュータビジョン分野では、物体表面上で観測される反射光に反射モデルを当てはめることで物体の表面状態を定量化し、物体表面の荒さ推定やコンピュータグラフィックス (CG) に利用してきた。しかし、近年、産業界では製品の差別化のために高級感を持たせた加飾技術が発達し、従来の反射モデルではうまく表現できない表面状態が増えてきた。例えば、冷蔵庫などの家電製品では、図 1 のような金属の微粒子を含む層を持った加飾フィルムによって高級感を出している。そこで、本論文では、これらのように表面下の微粒子などによって法線の分布が独特に変化する表面を対象とし、表面下の微粒子が作り出す複雑な反射を扱える多重法線反射モデルを提案する。また、図 2 で示す装置を用いて取得した観測値から推定した表面下の微粒子などによる鏡面反射から求めた法線尤度に、混合ガウスモデルを当てはめることで表面下の法線分布を解析する。

2. 多重法線反射モデル

家電製品などに用いられている加飾フィルムは、表面下に微細金属粒子を混入することで複雑な反射が起こり、独特な深みや高級感を表現している。このような物質は、表面は一つの法線が定まるが内側は複数の法線を持っている複雑な構造をしている。すなわち、一点を観測した時に表面と内部で法線の方向が異なり、カメラで撮影したときの 1 画素内でも複数の粒子が存在することで複数の法線を含むことになる。本論文で取り扱うような、表面下の微粒子

などの影響で画像内の 1 画素に複数の法線が対応する構造を多重法線構造と呼ぶこととする。

ここで、多重法線物体の反射モデルを定式化する。まず、反射光は拡散反射と鏡面反射の和で構成される。ここで、多重法線構造物体の表面による反射は物体表面上で一様であるが、表面下の微粒子による反射は観測点ごとに変化すると仮定する。そのため、鏡面反射成分は、物体の表面の反射と表面下の微粒子による反射の 2 つに分けて考える。表面下の微粒子による反射に関して、1 画素に K 個の法線を含むと考えると、 K 個それぞれについての反射を考える必要がある。これらを考慮し、多重法線反射モデルによる表面の明るさ i を式 (1) で定義する。

$$i = \rho_d \max(0, \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}) + \rho_{s1} R_1 + \rho_{s2} (F^t)^2 R_2 \quad (1)$$

$\mathbf{N}, \mathbf{L}, \mathbf{V}, \mathbf{H}$ はそれぞれ、法線ベクトル、光源ベクトル、視線ベクトル、ハーフベクトルとする。なお、ハーフベクトルは光源ベクトルと視線ベクトルの二等分方向である。式 (1) の第 1 項は拡散反射成分を表しており、一般的に広く用いられている Lambert モデルに従うものと仮定する。ここで、 ρ_d は拡散反射率である。第 2 項は物体表面の鏡面反射成分を表しており、広く用いられている Torrance-Sparrow モデルに従うと仮定する。ここで、 $R_1 = \frac{DGF^{r_1}}{\mathbf{N} \cdot \mathbf{V}} \mathbf{N} \cdot \mathbf{L}$ であり、 ρ_{s1} は表面層の鏡面反射率である。 $D = e^{-(\alpha n)^2}$ は法線分布項であり、物体の法線のばらつきを表す。 α は法線ベクトルとハーフベクトルの角度を表す。 $G = \min\left(1, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{V})}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}}, \frac{2(\mathbf{N} \cdot \mathbf{H})(\mathbf{N} \cdot \mathbf{L})}{\mathbf{V} \cdot \mathbf{H}}\right)$ は幾何減衰項であり、物体表面の形状によるマスキングとシャドウイングを表す。 $F^r = \frac{1}{2} \frac{(g-c)^2}{(g+c)^2} \left(1 + \frac{(c(g+c)-1)^2}{(c(g-c)+1)^2}\right)$ はフ

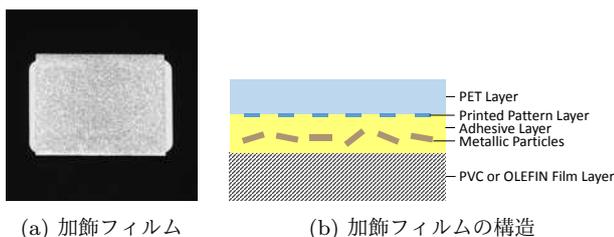


図 1 加飾フィルムとその構造

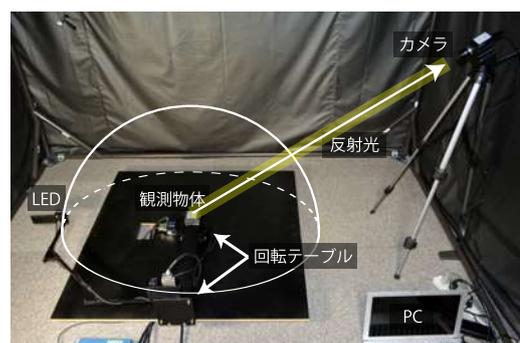


図 2 実験装置

¹ 大阪大学 産業科学研究所
² 奈良先端科学技術大学院大学
³ マイクロソフトリサーチアジア

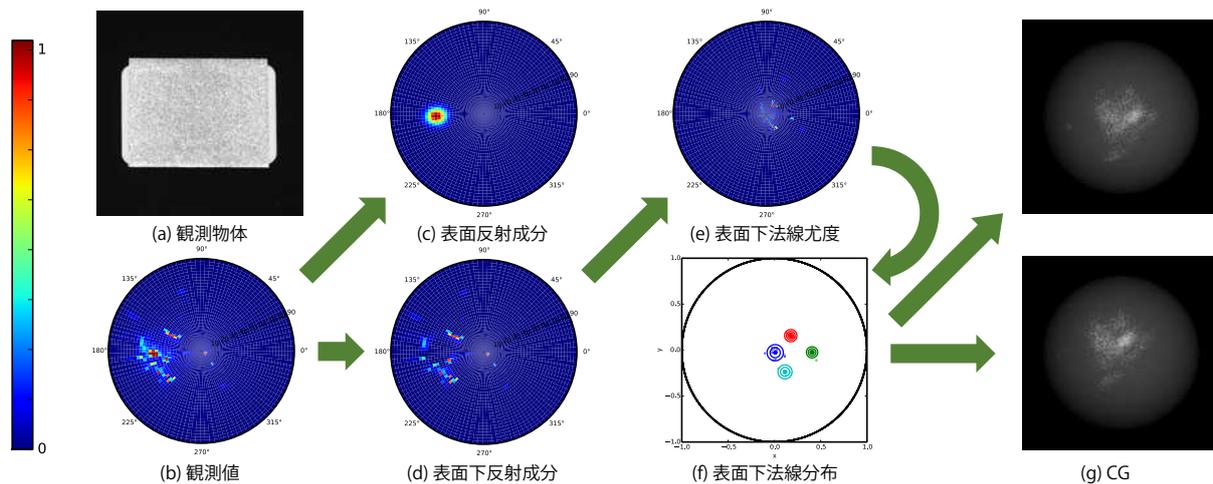


図 3 解析結果

レネル項であり，屈折率の異なる物体の境界面で生じるフレネル反射を表現する．この項において， $c = \mathbf{V} \cdot \mathbf{H}$ ， $g = \sqrt{\eta^2 + c^2 - 1}$ である． F^{r1} は表面層の境界面で生じるフレネル反射のふるまいを表す項である．また， η は相対屈折率であり，光が二つの媒質の境界面で屈折するときの屈折率を表す．第 3 項は表面下の微粒子による鏡面反射成分を表しており，1 画素に K 個の表面下層の法線を含む時に， K 個それぞれの表面下の反射を Torrance-Sparrow モデルの和で表したものであり， $R_2 = \sum_{k=1}^K \frac{D_k G_k F_k^{r2}}{\mathbf{N}_k \cdot \mathbf{V}} \mathbf{N}_k \cdot \mathbf{L}$ である．このとき観測される反射は，表面層を透過した光が表面下層で反射し，再び表面層を透過したものである．そのため，フレネル透過項を 2 回乗じる必要がある．ここで， F^{r2} は表面下層の境界面で生じるフレネル反射のふるまいを表す項であり， $F^t = 1 - F^r$ は表面層の境界面で生じるフレネル透過のふるまいを表す項である．

3. 表面下法線の定量化

多重法線物体の反射光を観測し，その観測値から表面下の微粒子の複雑な法線分布を定量化する．そのためには，表面下の反射成分を抽出する必要があり，反射成分を分離する必要がある．本研究では，提案した反射モデルのパラメータを変化させたときの値を利用したロバスト推定を行い，反射成分を推定する．この手法で，拡散反射と物体表面の反射を推定し，元の観測値からそれらを引くことで表面下の反射を求める．

得られた表面下反射から，法線は入射方向と反射方向の二等分方向であると仮定して，表面下の微粒子の法線分布を推定する．表面下の反射強度から法線尤度を求め，それを EM アルゴリズム [1] を用いて混合ガウスモデルに当てはめる．このとき，混合ガウス分布の最適な構成数はベイズ情報量 (BIC) を用いた評価で決定する．

4. 実験

撮影には図 2 に示す装置を用いて，光源座標 (θ, ϕ) を半球状に回転させたときの反射強度を $(45, 0)$ の方向に設置したカメラで撮影する．

撮影した加飾フィルムの観測値から反射成分分離し，表面下法線分布を混合ガウス分布にあてはめた結果を図 3 に示す．ここでは，拡散反射成分は無視できるほど弱いのので，掲載を省く．得られた表面下法線分布の混合ガウス分布のパラメータを利用することで，観測物体の表面下法線分布を適用した CG も作成することができる．ここで，図 3 に今回求めたパラメータを利用した球の CG を示す．なお，この CG は球の正面方向から異なる角度で光を照射したときの見え方を表現しており，表面下の反射を強調するために拡散反射成分と表面下反射成分のみをレンダリングしている．

レンダリングした結果，表面下の微粒子による複雑な表面下反射により，隣接画素間で大きく明るさが異なる反射が表現できている．しかし，微粒子の大きさや微粒子の空間分布を考慮できていないので，元の観測物体とは異なる見え方となった．今後は，微粒子の空間分布も考慮して，より表面下の構造を解析できるようにしたい．

参考文献

- [1] “sklearn.mixture.GMM scikit-learn 0.14 documentation”, <http://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.mixture.GMM.html>, (2014/05/28 アクセス).
- [2] 向川康博, コンピュータビジョン最先端ガイド 4, アドコム・メディア, 八木康史, 齊藤英雄編, 総ページ 156, 第 5 章「反射・散乱の計測とモデル化」, pp.121-150, ISBN978-4-915851-43-8, Dec. 2011.