

観測スケールを考慮した メタリック塗装の表面下法線分布解析

池本 祥¹ 向川 康博² 松下 康之¹ 久保 尋之² 八木 康史¹

概要：近年，産業界では製品の差別化のために高級感を持たせるための加飾技術が発達し，質感を定量化することが困難な表面の見えが増えてきた．例えば，自動車や家電製品に用いられるメタリック塗装では，塗膜中の微細な金属フレークの反射によって高級感を出しているが，そのキラキラとした質感を定量化することは難しい．そこで本論文では，これらのように表面下のフレークなどによって反射光が独特に変化する表面を対象とし，表面下の法線分布を統計的に解析することでメタリック塗装の質感定量化を行う．その際，メタリック塗装は観測距離に応じて反射の振る舞いが異なるため，適切な観測スケールを評価する．そして，反射データから推定した法線尤度に，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．また，解析した表面下の法線分布から，単位面積内のフレークの法線数や法線方向などの統計量を求め，質感の定量化を行う．さらに，独特な法線分布を持つ物体として，ヘアライン加工された金属についても同様に，法線分布を統計的に解析することで質感の定量化を行う．

1. まえがき

産業界では外装に「加飾」と呼ばれる特殊な塗装を施した製品が数多く生産されてきており，その一つとして，「高級感」を持たせた加飾技術であるメタリック塗装が挙げられる．メタリック塗装には様々な種類が存在し，自動車の外装には微細な雲母の粒子をクリア層に混ぜたパールマイカ塗装を用いて高級感を演出している．また，近年の家電製品などに用いられている金属フレークを含む層をもった加飾フィルムにおいても，同じような構造が観測される．これらの塗装は産業界において，高級感を表現する上で重要であるため関心が高いものの，その表面状態の質感を定量化することは従来手法では困難である．

人間がある物体を観察したときに視覚から感じる質感は，その物体の反射特性と深い関わりをもつ．例えば，鏡のように表面が滑らかなものは鏡面反射成分が強いためつやつやとした質感を感じるが，紙のように表面が粗いものは拡散反射成分が強いためざらざらとした質感を感じる．このように，物体の反射特性は，物体表面の微視的形狀に依存する．そのため，物体表面の微視的形狀を詳細に調査すれば，その物体の質感を定量的に評価することが可能になると考えられる．

そこで，本論文では，表面下に様々な方向を向いた金属フレークを含むメタリック塗装などの独特の質感を持った表面を対象とし，その反射データから表面下の金属フレークの法線分布を求める．また，その結果から単位面積当たりのフレークの法線数やフレークの向きを統計的に解析することで，質感の定量化をする．また，独特の法線分布を物体に与える加工として，ヘアライン加工が挙げられる．ヘアライン加工された金属も同様に，法線分布を解析することで，質感の定量化を行う．この手法では，反射光の空間分布を直接解析するのではなく，法線分布という物理的なパラメータを推定するため，環境に対して不変である．

2. 関連研究

2.1 従来の反射モデルが取り扱う表面状態

従来の反射モデルでは，物体の表面には観測スケールに対して十分に微細なマイクロファセットと呼ばれる構造を有するものとモデル化されている．例えば，鏡面反射を表現する Torrance-Sparrow モデル [1] は，物体表面を完全鏡面反射する微小面の集合で構成されると仮定したモデルである．このモデルは，照明方向と観測方向の両方を固定し，対象物体を法線方向を軸に回転させても明るさが変化しない等方性反射を仮定している．その他にも，異方性の反射を取り扱うことができる Ward モデル [2] でも，表面の構造は十分に小さいと仮定して反射を再現している．これらのモデルは物体を巨視的や微視的に見たときのそれぞれの

¹ 大阪大学
Osaka University

² 奈良先端科学技術大学院大学
Nara Institute of Science and Technology

反射の再現はできるが、その間の中間視的な状態も考慮したモデルではない。つまり、メタリック塗装に含まれるようなある程度の大きさを持つ金属フレークの一つ一つや、ヘアライン加工された金属中の傷の一つ一つまでは再現することができない。そのため、これらの反射モデルに観測データを当てはめるだけでは、メタリック塗装の質感を定量化することは難しいといえる。

2.2 メタリック塗装の質感定量化手法

メタリック塗装を遠くから見たときにはフレークによるキラキラとした反射はあまり感じられなく、近くで見たときにはフレークのキラキラした反射が強く感じられる。このように、メタリック塗装を評価するときには、マクロな光輝感とミクロな光輝感に分けて評価する必要がある[3]。マクロな光輝感とは、比較的遠くから観察される金属感であり、観察角の変化で色調が変化して見える。また、ミクロな光輝感とは近くから観察されるときキラキラと光る様子の金属感である。このミクロなスケールに着目すると、点光源に近い直接光を使用したときにミクロな光輝感の性質が強く現れ、複数の反射ピークが観測される。この反射ピークは、メタリック塗料に用いられている金属フレークの形状や粒子径、フレークの向きに応じて変化する。これらの性質に基づき、従来のメタリック塗装の質感定量化には、大きく分けて二つの手法が存在する。

一つ目は、メタリック塗装に特有な反射のピークを解析する方法である。分田ら[4]は、顕微光沢計を用いて反射強度を取得し、そのピークの山と谷の差を比較することで、金属フレークによるスパークリング効果を算出する手法を提案した。また、レーザー式メタリック感測定器[5]も開発されており、正反射から少しずれた方向の観測値の強度からメタリック感を表すパラメータを推定している。他にも、清井ら[6]は、撮影された画像の基準面内の金属フレークによる高輝度部の明るさや面積の平均や分散などのパラメータを説明変数とした重回帰式によって、目視での粒子感を定量化する手法を提案した。これらの手法は目視評価との相関があることが確認されているが、反射のピークという画像特徴を扱っているため、物理的な構造を表すパラメータではない。そのため、撮影方法や環境に依存するという問題がある。

二つ目はメタリック塗装の物理的な構造を推定する方法である。例えば、共焦点レーザー顕微鏡を用いることでメタリック塗装中の金属フレークの法線を個別に取得することができる。Sungら[7]は、その法線を大量に計測することで、メタリック塗装内のフレークの法線分布を推定し、反射特性の推定に応用する手法を提案した。この手法は物理的に正確なパラメータを推定できるが、顕微鏡を用いるため、計測に手間やコストがかかるなどの問題がある。

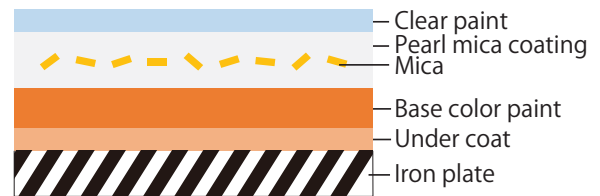


図1 パールマイカ塗装の構造

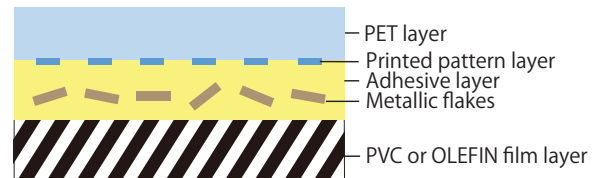


図2 加飾フィルムの構造

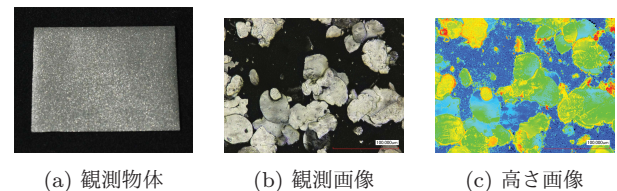


図3 レーザー顕微鏡を用いた観測

3. メタリック塗装における反射の仕組み

3.1 メタリック塗装の構造

一般に、メタリック塗料にはアルミニウムなどの金属フレークが混ざられている。そして、フレークの形状や大きさ、向きによって、見え方が異なる。フレークは、ほぼ同じ方向に面を向けながらもある程度のばらつきを持たせているため、正反射方向はフレークの向きに依存して様々な角度となり、従って反射光は様々な方向にピークをもつことになる。自動車の塗装で用いられているパールマイカ塗装は図1のような構造をしている。この塗装は、表面下に微細金属粒子や雲母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。家電製品などに用いられている加飾フィルムも図2のように、似たような構造を持つ。

また、図3(a)の加飾フィルムを透明体の表面・立体構造を計測することが可能な形状解析レーザー顕微鏡(KEYENCE VK-X250)を用いて観測した。すると、図3(b)のような構造が解析された。画像中の円盤状の物体が表面下のフレークであり、フレークの形状は概ね円盤状であるといえる。また、この画像の高さ情報をカラーマップで表示した結果が図3(c)である。この画像から、一つ一つのフレークは特定の方向に傾きを持っていることが確認できる。以上のことから、一つ一つのフレークは異なる半径の円形であり、様々な角度に傾いて含有されていることが分かる。

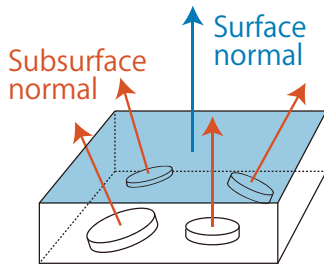


図 4 表面法線と表面下法線

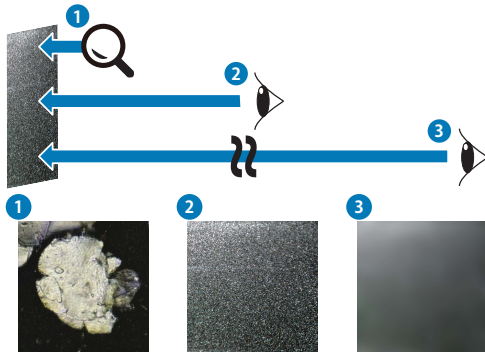


図 5 観測スケールに応じたメタリック塗装の見え方のイメージ

3.2 表面法線と表面下法線

一般に、物体はある点において、唯一の法線を持ち、一つの反射ピークを持つ。しかし、パールマイカ塗装や加飾フィルムのような物体は、表面の法線は一つに定まるが、表面下の金属フレークの影響で反射ピークが複数存在する。反射ピークの方法は、物体表面の法線方向に依存するため、これらの物体の反射を取り扱う際には表面下の金属フレークがどの方向を向いているのかを考慮する必要がある。そこで本論文では、図 4 に示すように、表面下にあるフレークなどの法線のことを「表面下法線」と定義する。この表面下法線の影響で、カメラで撮影したときの 1 画素内でも複数の法線を含むことになる。また、本論文で取り扱うような、表面下法線の影響で画像内の 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。

3.3 観測スケールによる反射特性の変化

メタリック塗装のような多重法線構造は、図 5 のように、観測スケールに応じて見え方が大きく異なる。適切な距離から観測したときは、メタリックの光輝感が感じられる。しかし、観測距離を近くしたり、倍率を高くして観測したときには、表面下に含まれる個別のフレークに着目してることになり、光輝感はあまり感じられなくなる。逆に、観測距離を遠くしたり、倍率を低くして観測したときにも、無数のフレークが対応して一つの粗い鏡面反射のようになるため、光輝感はあまり感じられなくなる。このように、メタリック塗装を評価する際には、メタリックの光輝感が感じられる適切な観測スケールを設定する必要がある。

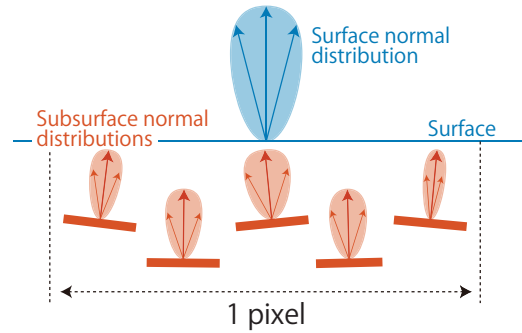


図 6 表面下法線の分布

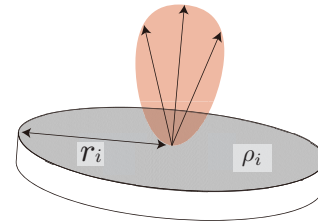


図 7 フレーク一つの法線分布

3.4 表面下法線の分布モデル

メタリック塗装の法線構造について、表面法線と表面下法線を考慮して図 6 のような法線の分布モデルを提案する。一般に微小面法線の分布はガウス分布と仮定することができる。しかし、メタリック塗装の表面下法線は 1 画素内に複数の法線を持つため、一つの分布だけでは表すことができない。そのため、表面下法線を複数のガウス分布の線形重ねあわせで表される混合ガウス分布を用いて表現する。すなわち、1 画素に K 個の表面下法線を含むときに、図 7 のような K 個それぞれの表面下法線をガウス分布の和で表す。それぞれのガウス分布は平均 μ と分散 Σ で表現される。また、フレークが大きいほど反射強度は強くなるので [8]、半径 r_i のフレークの面積を考慮する。また、物体表面の反射率を ρ_1 とし、表面下の金属フレークの反射率を ρ_{2_i} とする。すると、メタリック塗装の法線分布 N は式 (1) のようにモデル化できる。

$$N = \rho_1 \mathcal{N}(\mu, \Sigma) + \sum_{i=1}^K r_i^2 \rho_{2_i} \mathcal{N}(\mu_i, \Sigma_i) \quad (1)$$

しかし、後述する本手法では、観測値から法線分布を推定するため、金属フレークの反射率とサイズを別々に推定するのは困難である。そのため、金属フレークの反射率とサイズを一つの係数として扱う。また、物体の表面法線と同じ方向を向いている表面下法線を判別することは難しい。しかし、一般的にメタリック塗装の金属フレークは物体表面とほぼ同じ方向に面が向くように設計されているため、物体表面方向と同じ方向を向いている表面下法線は存在すると仮定できる。そのため、表面法線と同じ方向を向いている表面下法線は一つの法線として扱う。よって、本論文で取り扱う表面下法線分布のモデルを式 (2) と定義する。

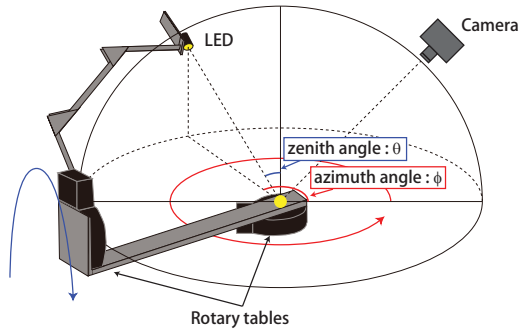


図 8 計測装置

$$N = \sum_{i=1}^K C_i \mathcal{N}(\mu_i, \Sigma_i) \quad (2)$$

4. 表面下法線の分布解析

4.1 法線方向の推定

表面下法線分布を推定するために、表面下法線の尤度を求める必要がある。簡単化のために鏡面反射のオフスペキュラーを無視すると、鏡面反射を生じる物体の法線方向は光源方向と反射方向の二等分方向と一致する。すなわち、法線方向は、視線ベクトル $\mathbf{v}$ と光源ベクトル $\mathbf{l}$ の二等分方向を示すハーフベクトル $\mathbf{h}$ となる。ハーフベクトル $\mathbf{h}$ は次式で求めることができる。

$$\mathbf{h} = \frac{\mathbf{v} + \mathbf{l}}{|\mathbf{v} + \mathbf{l}|} \quad (3)$$

つまり、物体に対して様々な方向から光を照射し、観測された反射光の強度が強ければ強いほど、そのハーフベクトル方向に法線がある可能性が高いといえる。そのため、観測した反射の強度を、光源ベクトルと視線ベクトルを用いてハーフベクトル方向に当てはめれば、表面下法線の尤度を算出することができる。

そのための計測方法として、カメラと観測物体は固定し、光源のみを回転させる。すなわち、図 8 に示すようなセッティングで光源方向 (θ, ϕ) ごとに反射光を計測する。この際、拡散反射光は鏡面反射光に比べて十分に小さいため、無視できると仮定する。

4.2 EM アルゴリズムを用いた表面下法線の分布推定

推定した表面下法線の尤度を混合ガウス分布に当てはめることで表面下法線分布を推定する。ただし、ハーフベクトルの方向を仰角と方位角 (θ_h, ϕ_h) とすると、 $\phi_h = 0^\circ$ と $\phi_h = 360^\circ$ が同じ角度になり、また、 $\theta_h = 0^\circ$ では θ_h を変化させても同じ角度になるなど、扱いが煩雑になる。そこで、図 9 に示すように、球を天頂方向から見たときの 2 次元平面で考えたときの座標系に変換して扱う。

最尤推定の手法として、不完全データから最尤推定値を求める手法である EM アルゴリズム (期待値最大化法)[9] が利用されることが多い。そのため、本研究でも、EM ア

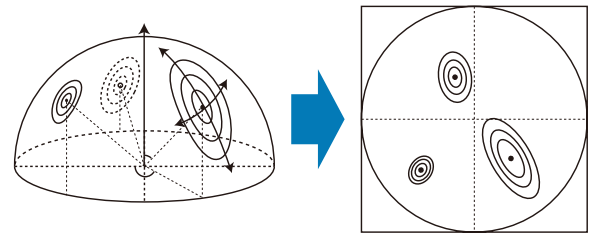


図 9 混合ガウス分布で扱う座標系

ルゴリズムを用いて、表面下法線の尤度に混合ガウス分布を当てはめる。

混合ガウス分布を当てはめる際には、構成するガウス分布の数を設定する必要がある。その構成数が多ければ全てのデータをカバーすることは簡単になるが、過適合になってしまい、冗長な表現になってしまう。そのため、モデルに対する適切な構成数を決定する必要がある。メタリック反射の場合、一つのフレークによる反射は、一つの反射ピークを持つ。この観測に基づき、観測された反射データの中の反射ピークの数、表面下法線の分布の構成数であると仮定する。

4.3 表面下法線の統計量の算出

ここでは、推定した表面下法線分布と実際のフレークの状態との関係性について述べる。提案モデルでは、一つの表面下法線分布を一つのガウス分布に当てはめている。そのため、混合ガウス分布の構成数は観測画面内のフレークの個数に対応している。

また、各法線分布の分散の値は、金属フレークの表面粗さを表す。金属フレークの表面が粗ければ、対応する各法線分布の分散は大きくなり、表面が滑らかであれば法線分布の分散は小さくなる。さらに、各分布が等方であるかを調べることで、異方性を定量化できる。この際、各正規分布の異方性は、正規分布の長軸と短軸の比率で表現することが出来る。長軸と短軸の比率は、正規分布の共分散行列の 2 つの固有値の比率を求めればよい。

フレークの方向など、方向に関するデータは単純に角度の算術平均を求めても正しい平均的な方向は求めることはできない [10]。そのため、方向統計学の概念にしたがって方向の平均と分散を求める必要がある。方向の平均を求めるためには、角度をそれぞれの角度方向の単位ベクトルに変換して、単位ベクトルの平均方向を求めればよい。まず、 N 個の角度方向の平均方向を求めるならば、角度方向に対しての単位ベクトル $\mathbf{n}$ を用いて、平均合成ベクトルは次式で表される。

$$\bar{\mathbf{n}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{n}_i \quad (4)$$

このベクトルの方向が N 個の角度方向の平均方向である。また、方向の分散は circular variance[11] を用いることとし、次式で表せる。

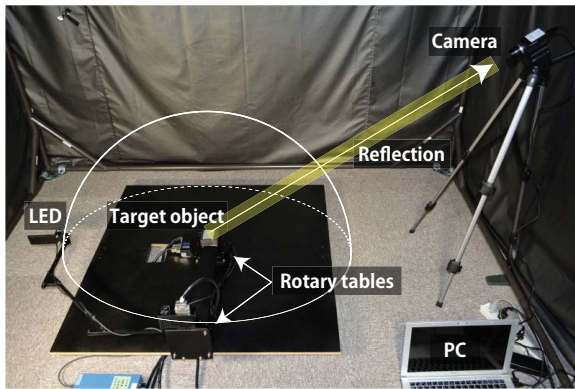


図 10 実験装置

$$\text{Var}(\mathbf{n}) = 1 - |\bar{\mathbf{n}}| \quad (5)$$

この値が1に近ければ分散が大きく、0に近ければ分散が小さいといえる。これにより、方向に関する統計的なデータを適切に扱うことができる。

これらの物理的特徴量に関して、それぞれの統計的な平均値と分散が分かれば、質感を定量化することができる。また、多重法線構造に特有なキラキラした反射には、表面下法線の個数とその法線方向の分散が大きく起因すると予想できる。そのため、これら二つのパラメータに着目することで、物体がどれだけキラキラしているのか定量化できる。

5. 実験

5.1 実験環境

メタリック塗装のように様々な方向に法線が存在する物体の法線分布を推定するためには、対象物体に対して半球状に光を照射する必要がある。そのため、実験装置として図10で示すような、半球状に光源(日進電子工業株式会社 W3VP-8)を動かして撮影できるシステムを作製した。フレイクによるキラキラした反射を取得したいため、光源には点光源に近いLEDを採用した。なお、物体と光源までの距離は50cm離れた。多重法線構造を持つ物体の詳細な反射の変化を観測するため、カメラはモノクロカメラ(PointGrey GS3-U3-28S4M-C)を使用する。カメラの位置は物体の法線方向では、表面の鏡面反射の影響を大きく受けてしまい微細構造の法線の反射が計測しにくいので、仰角を45°ずらした(45,0)の位置から撮影する。このとき、多重法線構造では隣り合った画素でも法線方向が異なることによって反射が異なるので、10×10の隣接100画素分の反射光を計測する。カメラの設定はISO感度は100、F値は11、シャッター速度は観測結果に合わせて適切に設定する。カメラの有効ビット数は14bitである。本システムにより、角度 θ と ϕ をそれぞれ3°ずつ回転させて反射光を計測する。

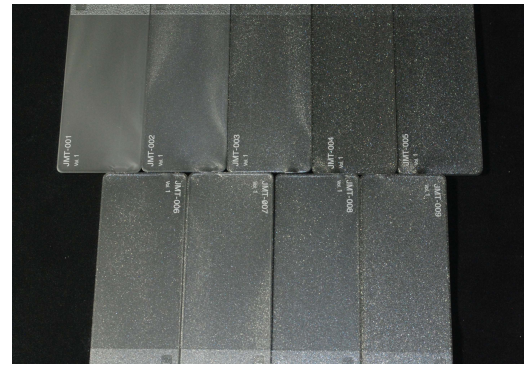


図 11 メタリック塗装の計測物体。上段左から順に 5, 20, 40, 55, 90 μm のアルミフレイクが含有量 1%, 下段左から順に 30, 40, 60, 90 μm のアルミフレイクが含有量 2%で埋め込まれている。

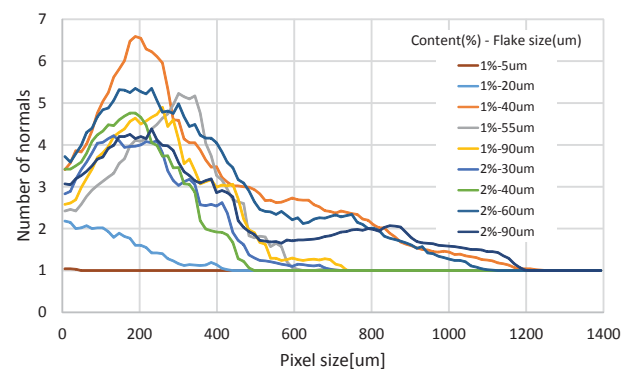


図 12 画素サイズごとの法線数。「含有量(%) - フレイクの大きさ(μm)」のプレートを用いている。

5.2 適切な撮影スケールの確認

多重法線構造を持つ物体は、撮影スケールに応じて、1画素内での反射の振る舞いが大きく異なる。そのため、適切な撮影スケールで解析する事は重要となる。

適切な撮影スケールを調べるため、1画素のスケールを様々な変化させて計測した際の反射ピークの数を求める。ただし、撮影スケールの変更は実際にカメラの撮影倍率を変化させるのではなく、できるだけ高倍率で撮影した画像にダウンサンプリング処理を適用することで1画素のスケールを仮想的に変化させる。本実験では焦点距離が75mmのレンズにエクステンション・チューブを取り付けることで、極めて高倍率での撮影を行った。その結果、1画素のサイズが約7 μm で撮影することができた。対象物体として、図11に示す、アルミフレイクが埋め込まれたアクリル樹脂プレート(JIDAスタンダードサンプルズ・2)を用いた。

その結果、画素サイズごとの法線数が図12のようになった。この結果から、観測スケールに応じた1画素の反射の振る舞いの変化を確認できる。画素サイズが小さいときに法線数が一つにならないのは、表面法線と表面下法線が混在しているためであると予想でき、実際の表面下法線は表

面法線の数一つを引いた数になると予想できる。以後、解析の際には、最もメタリックの光輝感が感じられる1画素あたりの表面下法線数が多い画素サイズでそれぞれ解析を行う。それらを平均すると、1画素が約 $170\mu\text{m}$ のスケールになる。

質感は人間の目で見られるため、評価基準として標準的な人間の視力を考慮する必要がある。視力検査を基準にしたとき、視力1.0の人間は5mの距離からランドルト環の1.45mmの切れ目を認識することができる。つまり、5mの距離における人間の目の解像度は17.52ppiということになる。この考えに基づく、1画素のサイズが $170\mu\text{m}$ というスケールは、人間が約58cmから物体を見たときの観測スケールに対応するので、質感評価にも妥当なスケールであるといえる。

5.3 スタンダードサンプルを用いた評価

実験には、図11に示すアルミフレークが埋め込まれたアクリル樹脂プレートを用いて反射の計測を行った。入射角度の方向に正規化した観測輝度値をプロットした半球の図を、代表的な結果として1%-40 μm 、1%-90 μm 、2%-90 μm の結果のみ抜粋して図13に示す。この結果から、多重法線物体は複数の反射のピークを持つことが確認できる。なお、この観測結果は隣接画素では大きく異なる。

また、この観測値を用いて表面下法線の分布を推定した結果を図14に示す。全体的に天頂方向に法線が向いているが、その方向性にはバラつきが見られる。また、結果は隣接画素でも表面下法線分布は大きく異なる。

推定した表面下法線分布の結果100画素分のデータを元に、対象物体の物理的な統計量を求めた結果を表1に示す。まず、1画素内の法線数の平均・標準偏差について調べた。1%-40 μm と1%-90 μm を比較すると、同じ大きさの画素内に含まれる法線数は、フレークサイズが大きい方が少ない結果となった。しかし、図12の結果のように、フレークの大きさと単位面積内に含まれるフレークの法線の個数には、明白な相関は確認できない。また、1%-40 μm と2%-40 μm や1%-90 μm と2%-90 μm を比較すると、含有量の少ないプレートの方が法線数が小さくなったが、その標準偏差は大きい結果となり、観測点ごとの差が大きい結果となった。

次に、表面下法線がどの方向を向いているのかについての平均方向と、方向の分散について調べた。平均方向については、仰角・方位角を用いて (θ, ϕ) [deg] で表す。その結果、どのプレートも表面下法線は平均して天頂方向を向いていることが確認できる。また、フレークの含有量が多いほど法線方向の分散が大きい結果となった。フレークサイズに関しては明確な相関は確認できないが、1%の含有量のものだけに着目すると、サイズが大きくなるほど法線分散が大きくなる傾向が確認できる。

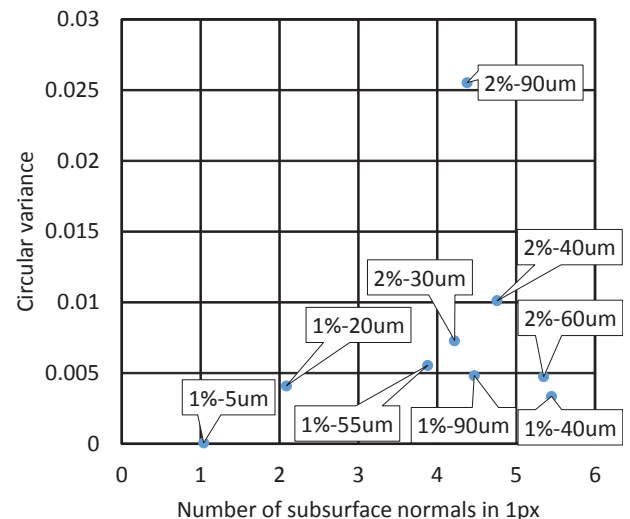


図15 1画素内の表面下法線数と法線方向の分散の関係

次に、金属フレークの表面粗さを表す、共分散行列の固有値 λ_1, λ_2 ($\lambda_1 > \lambda_2$) の平均値と、その比率の平均について調べた。フレークの表面粗さの異方性に関しては、フレークサイズと含有量が多くなるにつれて等方に近づく。これは、フレークが密になるほど法線分布も密になるため、複数の等方な正規分布で当てはめるのが良い結果になっていると予想できる。

次に、1画素内の表面下法線数と法線方向の分散から、どのくらいキラキラしているのかの関係を図15に示す。実物体の見た目と結果の比較から、グラフ中の右上にプロットされるほど、キラキラ感を強く感じることが確認できる。この結果から、メタリック塗装などの多重法線物体のキラキラと輝く独特な反射の定量化が実現できたことがわかる。

6. ヘアライン加工への適用

6.1 ヘアライン加工の性質

パールマイカ塗装や加飾フィルムだけではなく、独特な法線分布を持つ物体として、ヘアライン加工された金属も、我々の身の回りに多く見られる。金属板の表面仕上げ方法のうち、金属表面に髪の毛のように細かいラインが直線的に研磨された仕上げのことをヘアライン加工と呼ぶ。ヘアライン加工は、物体を観測面の法線を軸に回転させたときに明るさが変化する異方性反射が観測される物体である。ヘアライン加工された金属では、ブラシ方向に応じて反射が線対称になる。

ヘアライン加工もメタリック塗装と同様に、観測スケールに応じて見え方が大きく異なる。手で持って見るような通常の観測スケールでは、多数のヘアラインの傷が見え、鏡面仕上げと異なり金属の質感を強く感じられる。観測距離を近くしたり、倍率を高くして観測したときには、1つ1つの傷に着目していることになり、傷の断面方向に法線

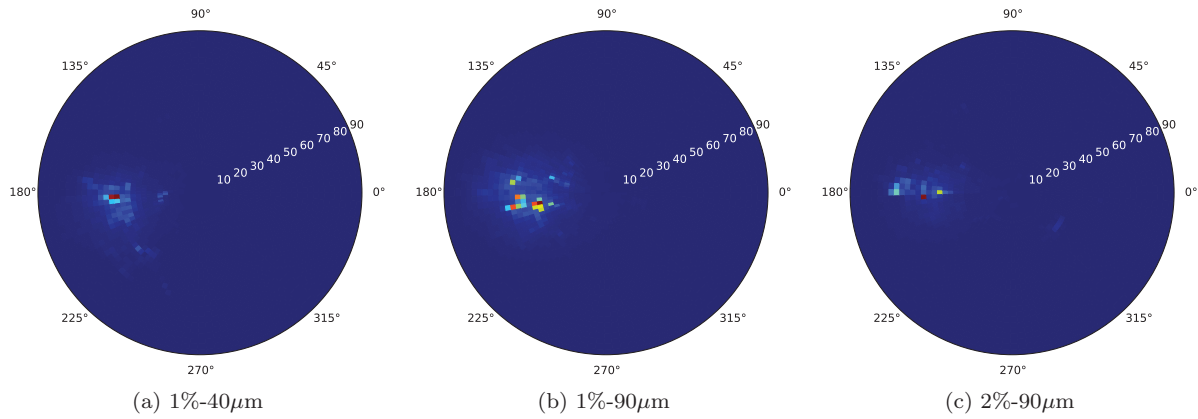


図 13 観測輝度値. 半球を天頂方向から見た図であり, 入射方向座標に観測値を当てはめている.

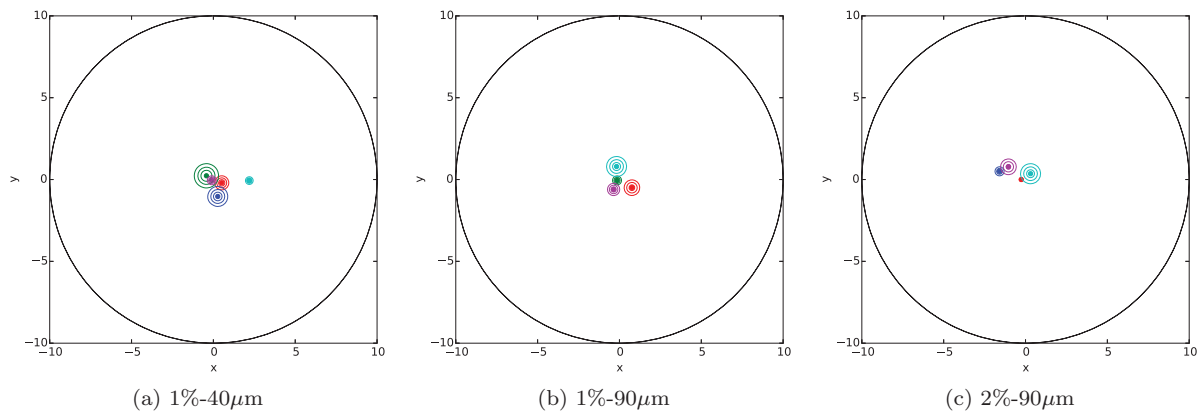


図 14 表面下法線分布. 図 9 に示す座標系で表現しており, 半球を天頂方向から見た図である.

分布が存在する. 逆に, 観測距離を遠くしたり, 倍率を低くして観測したときは, 無数の傷が対応して, 傷が見えない異方性反射が観測される.

6.2 ヘアライン加工の法線分布推定

メタリック塗装では, 金属フレークが様々な方向を向いている影響でフレークの法線の数がフレークによる反射ピークの数と対応しているため, 反射ピークの数で法線分布の数を決定した. しかし, ヘアライン加工では傷の大きさが一定ではなく, 大きな傷から小さな傷まで含まれているため, 法線分布の数をメタリック塗装と同様に決定することはできない. そのため, 法線分布の推定手法はメタリック塗装と同じであるが, 混合ガウス分布の構成数の決定方法を変更する. 混合ガウス分布の構成数を総当りで評価し, モデルに対する適切な構成数を決定するための指標として次式で表される BIC (ベイズ情報量) を用いる.

$$BIC = -2\ln(L) + K \ln(N) \quad (6)$$

ここで, L は最大尤度, K はパラメータ数, N は標本数を表す. この BIC の値が小さいものが最適なパラメータであり, 混合ガウス分布の構成数を求めることができる.

6.3 ヘアライン加工の法線分布の統計量の算出

ここでは, 推定した法線分布とヘアライン加工の表面状態との関係性について述べる. ヘアラインの傷が強い場合, 傷の斜面の方向に対して複数の構成数の分布が生じる. そのため, 分布の構成数はヘアラインの傷の強さと対応する. また, 法線分布の分散がヘアライン加工の表面粗さに対応する. 特に, ヘアライン加工は反射に異方性を生じるため, 法線分布の異方性を求めることで, 反射の異方性を求めることができる.

これらの物理的特徴量に関して, それぞれの統計的な平均値など分かれば, 質感を定量化することができる.

6.4 ヘアライン加工の解析結果

対象物体には図 16 に示すヘアライン加工された金属を三つ用いた. 左上の金属は他の二つに比べてヘアラインが弱く, 下の金属は他の二つに比べてヘアラインが強い. 右上の金属は左上の金属の裏面を金やすりで研磨することで, 中間的なヘアライン状態を作成した. これら三つのヘアライン加工された金属を用いて解析を行う.

まず, スケールを変化させた際の 1 画素内の法線分布数を図 17 に示す. ヘアラインの傷が強ければ強いほど, 1 画素内の法線分布数が多い. スケールを変化させた際の法線分布数の変化が少ないのは, 様々なスケールの傷が混在して

表 1 メタリック塗装の解析結果

フレイク	1%-5 μ m	1%-20 μ m	1%-40 μ m	1%-55 μ m	1%-90 μ m	2%-30 μ m	2%-40 μ m	2%-60 μ m	2%-90 μ m
平均法線数	1.04	2.09	5.45	3.88	4.47	4.22	4.76	5.35	4.38
法線数標準偏差	0.19	0.91	1.43	0.81	1.26	1.02	1.69	1.12	1.46
平均法線 (θ, ϕ) [deg]	(1.1, 269.9)	(2.9, 282.0)	(1.8, 291.4)	(3.5, 264.9)	(1.3, 345.2)	(3.5, 288.2)	(3.4, 318.1)	(1.9, 274.9)	(3.3, 355.4)
法線分散	0.01×10^{-2}	0.24×10^{-2}	0.33×10^{-2}	0.54×10^{-2}	0.48×10^{-2}	0.72×10^{-2}	1.01×10^{-2}	0.47×10^{-2}	2.55×10^{-2}
$\bar{\lambda}_1$	0.23	0.30	0.14	0.26	0.17	0.14	0.21	0.15	0.13
$\bar{\lambda}_2$	0.15	0.22	0.14	0.24	0.15	0.13	0.17	0.15	0.12
$\sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}}$	0.81	0.75	0.80	0.65	0.90	0.90	0.87	0.98	0.94

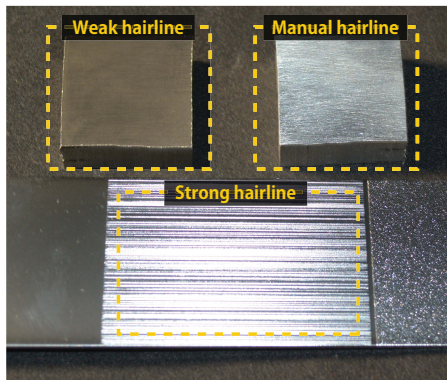


図 16 ヘアライン加工の計測物体

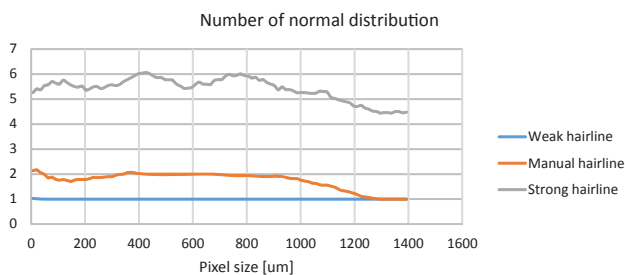


図 17 画素サイズごとの法線分布数

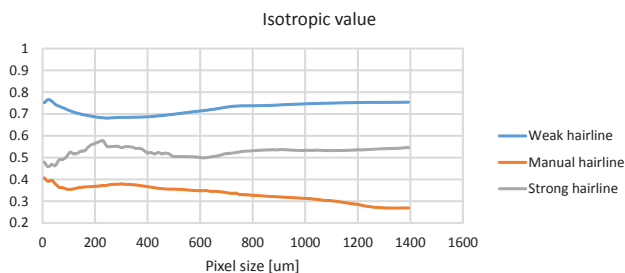


図 18 画素サイズごとの法線分布の異方性

いるためであると予想できる。

また、スケールを変化させた際の法線分布の異方性を図 18 に示す。人為的にヘアラインをつけた金属は他の金属に比べてヘアラインの傷が多く、ヘアラインの間隔が狭い。この結果から、ヘアラインの間隔が狭いほど異方性が強いことが分かる。スケールを変化させても、法線分布の異方性は大きく変化しない。

以上のことから、メタリック塗装はスケールの違いが表面下分布に大きく影響するが、ヘアライン加工にはあまり

影響しないことが分かった。それは、金属フレイクのような大きな物体が反射に影響を与える場合ではスケール変化に対しても大きく影響するが、ヘアライン加工では、傷の中にもさらに微小な傷が存在するためスケール変化に対してはあまり多く影響しないと予想できる。また、ヘアラインの傷の強さや間隔の違いは法線分布にも影響を与えることが確認できた。そのため、法線分布を解析することでヘアライン加工の質感を読み取れると予想できる。

7. むすび

本研究では、表面下のフレイク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、表面下の法線分布を統計的に解析することでメタリック塗装の質感定量化を行った。表面下法線分布を光の反射から推定し、その統計量から 1 画素内の法線数とその方向の平均と分散を求めることができた。また、1 画素のサイズごとの法線数を求めることで、適切な観測スケールでの評価を行うことができた。その結果、1 画素内の法線数とその方向の分散はキラキラとした質感を表現するパラメータとして有効であることを確認した。

また、同様にヘアライン加工の法線分布を解析することで、スケール変化に対する法線分布の振る舞いの変化を求めた。その結果、ヘアラインの傷の強さと間隔が法線分布に影響を与えることを確認した。

本研究では質感を表現する特徴の検出を行っているが、今後は、これがメタリック塗装に特有な深みや高級感などの人間の知覚とどのように対応するのか調査したい。また、ヘアライン加工された金属の質感定量化のために必要な特徴をさらに増やせるように解析を進めていきたい。

参考文献

- [1] Torrance, K. E. and Sparrow, E. M.: Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces, *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 57, No. 9, pp. 1105–1112 (1967).
- [2] Ward, G. J.: Measuring and Modeling Anisotropic Reflection, *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 26, No. 2, pp. 265–272 (1992).
- [3] 川口洋一, 高橋輝好, 山長 伸: メタリックカラーにおける質感再現方法, 塗料の研究, No. 145, pp. 14–21 (2006).
- [4] 分田槌男, 清水省三, 春木和由, 磯谷日出男, 品田 登, 佐々木良夫, 田辺照美, 高橋 宏, 宮下好弘, 桑木 績, 川上元郎, 平井敏夫: メタリック感の計測方法, 色材協会誌, Vol. 43, No. 8, pp. 375–383 (1970).

- [5] 竹内 徹, 寺沢秀夫: メタリック塗膜の定量的評価および測定装置について, 第 10 回塗料・塗装技術総合研究発表会要旨集, p. 42 (1992).
- [6] 清井計弥, 山本信次, 森川 収: メタリック色の粒子感の測定, 日本色彩学会誌, Vol. 30, No. 1, pp. 9–15 (2006).
- [7] Sung, L. P., Nadal, M. E., McKnight, M. E., Marx, E. and Laurenti, B.: Optical reflectance of metallic coatings: Effect of aluminum flake orientation, *Journal of Coatings Technology*, Vol. 74, No. 932, pp. 55–63 (2002).
- [8] Levin, A., Glasner, D., Xiong, Y., Durand, F., Freeman, W., Matusik, W. and Zickler, T.: High Spatial Resolution BRDFs with Metallic powders Using Wave Optics Analysis (2013).
- [9] Dempster, A. P., Laird, N. M. and Rubin, D. B.: Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm, *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*, Vol. 39, No. 1, pp. 1–38 (1977).
- [10] Bishop, C. M.: *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*, Springer-Verlag New York, Inc., Secaucus, NJ, USA (2006).
- [11] Mardia, K. V.: *Statistics of Directional Data*, Probability and Mathematical Statistics a Series of Monographs and Textbooks, Academic Press (1972).