

異方性反射によるレリーフ表示の基礎検討

河合 直 樹^{†1}

本論文では、平滑な面に溝を付与することで生じる異方性反射現象を利用して、任意のレリーフ状の立体形状が光線の変化にともなって見える像の変化を物体表面に近似的に表示する手法を提案する。まず、立体形状の法線ベクトル分布を投影面上に求め、投影面に対して任意角度に設定した法線投影面に法線ベクトルを投影することで、溝の向きの分布を表すスカラー場に変換する。次にこのスカラー場に沿う線群を生成し、初めの法線ベクトル場の性質を継承した溝パターンの版下を生成する。最後にこの版下を溝として実体化し、その結果生じる異方性反射によって当初の立体形状表面に現れる反射の変化を表示できることを示す。この手法により、印刷やエンボス加工などの一般的な加工手段を利用して、ほぼ平滑な媒体面に、レリーフを施した場合と同様の視覚効果を持つ表示が可能であることを確認した。

A Basic Study for Showing Relief by Anisotropic Reflection

NAOKI KAWAI^{†1}

We propose a method for showing the light-depending reflection of arbitrary relief-like shape onto the surface of real objects using anisotropic reflection caused by grooves on flat media. We first obtain the distribution of normal vector by projecting modeled objects in three-dimensional space onto a screen, and convert the obtained vector field into the scalar field representing the orientations of grooves by projecting normal vectors on the normal projection plane. We next draw straight or curved lines following converted scalar field and generate a binary image that succeeds the distribution of the original normal vector. We lastly substantiate the pattern of the generated binary image and show that the resulted anisotropic reflection indicates the changing reflection of the original shape. We also prove that the three-dimensional visual effect similar to the work in high relief appears on almost plain surfaces with ordinary processes such as printing and embossing.

1. はじめに

工業製品の表面を装飾する技法の1つとして、革、樹脂、紙などの素材に広く利用されているエンボス加工があげられる。なかでも、レリーフ状の意匠で金型を作製して紙に型押ししたり、同時に金属の薄膜を接着したりする箔押し工法は、安価な装飾手法として普及している。身近な例では、食品などの紙製の包装容器において、ロゴやデザインを強調するために箔押しが使用される。箔押しが施された面はレリーフとなるが、紙の伸縮の限界から数百 μm 程度の高低差を加工することが限界となる。熱可塑性樹脂ではより大きな高低差を加工できるが、運送上の安定性や容積効率の観点から実用に適さない。このような制約から、限られた高低差でできるだけ大きな凹凸を演出するためにレリーフの深度調整が行われるが、この作業は作業者の経験に依存している。コンピュータグラフィクス(CG)分野では、Weyrichら¹⁾がこの問題に着目し、3次元で設計したデザインの前後関係や面の勾配に配慮しつつ、合理的にレリーフ面の高低差を調整する手法を提案している。

一般的なCGのレンダリングでは微細な凹凸を効率的に表現するための手段として、バンプマッピング²⁾が多用される。バンプマッピングは形状表面に対して見かけ上の法線の揺動を与えるが、実際の箔押し面でも法線の分布が反射を制御し見え方を支配している点で、バンプマッピングとエンボス加工は類似している。この考察は、見かけ上の法線を操作し、対象面の反射を制御できれば、平面物体上で立体的な視覚効果が得られることを示唆する。

反射特性の中でも、異方性反射特性を表現する手段として双方向反射率分布関数(Bidirectional Reflectance Distribution Function; BRDF)が提案され³⁾、多くのCGソフトで実装されている。Ashikhminら⁴⁾は、物体表面の微細構造からBRDFを算出する技法を提案した中で、意図的にBRDFを設計することにより物体上に絵柄を表示できる可能性を示した。この着想は、3次元形状の法線分布を実物体の微小面素の集合として形成することにより、平面に立体形状の反射が再現できることを示唆する。さらにWeyrichら⁵⁾は矩形の微小面を多数定義し、演算により個々に与えた傾斜面を実体化することで、任意のBRDFを実物体に付与できることを示した。ただし実用上は、紙などの柔らかい素材への加工では揺り戻しなどの諸条件により忠実な複製が困難であり、量産には低い加工精度でも反射を制御する工夫が必要となる。

^{†1} 大日本印刷株式会社
Dai Nippon Printing Co., Ltd.

金属製品に着目すると、つや消しなどの目的で、表面に細かい溝を付与するブラシ仕上げが多用される。溝は結果として異方性反射を生じ、たとえば同心円状の溝を付与したオーディオ機器のつまみでは観察条件により向きや広がりが増える扇形のパターンが出現する。このような溝による異方性反射について、Yokoi ら⁶⁾ が楕円体の反射強度分布モデルを提案し、Poulin ら⁷⁾ は物体表面の個々の溝を円柱で近似することで、反射特性を円柱の形状と配置を表す少数のパラメータで記述できることを示した。Ward⁸⁾ は、異方性反射特性の計測装置を提案した中で、鏡面反射率の変化を表す一般的な反射モデルを示した。Beatty⁹⁾ は、金属などに指を擦り付けた油脂の痕に同様の異方性反射が生じることや、溝の付与により生じる明暗パターンが一部の芸術作品に利用されていることを報告している。金属表面のブラシ仕上げや油脂の痕では個々の溝の微細形状は不均一であることから、観察されるパターンの形成には、溝の微細形状ではなく走行方向の寄与が支配的であることが分かる。溝による異方性反射を装飾として利用している例としては、光線彫りとよばれる彫刻技法があり、宝飾品や金属製ライタなどで利用されている。光線彫りでは、対象面をデザイン要素の領域に分割し、領域ごとに個別の角度で溝を付与するが、この作業は経験に依存しており、表現できるのは平面的なデザインや単純なデザインに限定される。

以上の考察から、立体形状の法線分布を何らかの規則で溝の方向分布として実物体上に継承して実体化することで異方性反射を再現し、立体形状の反射像を表現する装飾が可能になると予測できる。従来の溝による異方性反射の研究は写実的なレンダリングを目的としており、溝の向きを制御することによる立体形状の表示は報告されていない。本論文では、平滑な媒体面に溝を形成し、その面を正面から観察して光の入射方向を変化させた反射強度分布により、モデリングされた立体形状が見せる反射像の変化を近似的に表示する手法を提案する。提案手法により、高低差の大きい加工が困難なパッケージなどの紙製品や合成皮革・金属などの素材に対し、浅い溝のみを付与して深いレリーフ効果の装飾を実現できる。ここで安価な量産を可能にするため、溝の付与にはエンボス加工などの低い精度の製造手段を用いることを前提とする。以降、表現する立体形状を目標レリーフ、溝を形成した媒体に表示される像を擬似レリーフとよぶ。

本論文で提案する擬似レリーフ作製手順の概要を図 1 に示す。はじめに CG ソフトのモデリング機能などを利用して、目標レリーフの 3 次元形状を設計する。次に通常のレンダリングにおける輝度計算のかわりに、目標レリーフの投影面における法線ベクトル分布を取得する。法線分布は後述する演算手順により溝の走行方向を定義する溝角度分布に変換され、投影面にこの角度分布に沿った直線または曲線を充填することで溝パターンの版下を生成す



図 1 擬似レリーフの作製手順

Fig.1 Overall process for making a pseudo relief.

る。最後に生成した溝パターンを浅い溝として実体化することで、異方性反射により擬似レリーフを表示する媒体となる。

以下、2 章では平面に付与された溝による反射特性を考察し、3 章では 3 次元空間に定義された目標レリーフの法線と 2 次元媒体の溝の角度の対応を考察し、立体像表示のための溝角度への変換手順を示す。4 章では定義された溝角度分布に追従した溝パターンの生成手順を示す。5 章では提案手法に基づいて実際に媒体を製作し、手法の有効性を示すとともに、実用性や課題を議論する。

2. 平行溝の反射特性

多数の平行な溝が形成された媒体面を正面から観察した場合の、光線方向に依存した反射率の変化を考察することで、後の変換の前提となる近似された反射モデルを導出する。また平行溝を実体化した実験により反射モデルの妥当性を示す。

2.1 座標系

図 2 に示すように、3 次元の右手座標系において、 xy 平面で多数の溝が x 軸に平行に配列しており、 z 軸正方向から観察することを考える。光の入射方向や反射方向は極座標系を用いて方位角と天頂角で表現することとし、方位角 ϕ は x 軸正方向を 0° として反時計回り、天頂角 θ は z 軸正方向となす角度とする。

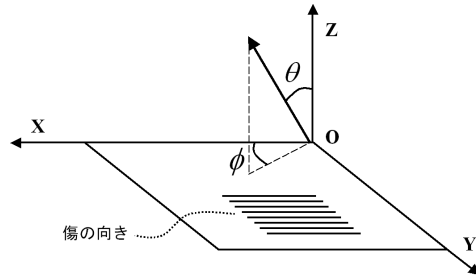


図 2 媒体と溝を表す座標系
Fig. 2 A coordinate system.

2.2 溝を有する面の反射特性

Ward⁸⁾ は、溝を敷き詰めた面のように、直交する 2 方向に異なる傾斜の分布を持つ面の鏡面反射率 ρ_{bd} を、以下の式でモデル化した。

$$\rho_{bd} = \rho_s \frac{1}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_r}} \cdot \frac{\exp\{-\tan^2 \theta_H (\cos^2 \phi_H / \alpha_x^2 + \sin^2 \phi_H / \alpha_y^2)\}}{4\pi \alpha_x \alpha_y} \quad (1)$$

ここで、

ρ_s : 素材自体の鏡面反射率

α_x : x 軸方向に沿った勾配の標準偏差

α_y : y 軸方向に沿った勾配の標準偏差

θ_H : ハーフベクトルの天頂角

ϕ_H : ハーフベクトルの方位角

θ_i : 入射ベクトルの天頂角

θ_r : 反射ベクトルの天頂角

本節ではこの反射モデルに対し、本研究で前提とする条件で簡略化し、異方性反射を少数のパラメータで近似する反射モデルを導出する。

まず、素材全体の鏡面反射率は一定であり、定数として扱うことができる。

$$\rho_s = \text{定数} \quad (\text{仮定 ①})$$

肉眼では個々の溝からの反射は知覚されず、有限領域からの反射の総量が知覚される。溝の幅や深さを一定に設計すれば微細形状の個体差は統計的に無視できるため、

$$\alpha_x = \text{定数} \quad (\text{仮定 ②})$$

$$\alpha_y = \text{定数} \quad (\text{仮定 ③})$$

と見なすことができる。 α_x および α_y は溝の設計に依存した係数となるが、溝は x 軸に平行に付与することから、

$$\alpha_x \ll \alpha_y \quad (\text{仮定 ④})$$

となる。次に、本研究では媒体を正面から観察した場合の反射像を対象とするため、視点を z 軸方向に一致させることにより、

$$\theta_r = 0 \quad (\text{仮定 ⑤})$$

$$\phi_H = \phi_i \quad (\text{仮定 ⑥})$$

となる。ここで、 ϕ_i は入射光の方位角を表す。さらに、入射光の天頂角を固定し、方位角の変化のみに着目することで、

$$\theta_i = \text{定数} \quad (\text{仮定 ⑦})$$

$$\theta_H = \text{定数} \quad (\text{仮定 ⑧})$$

とすることができる。

以上の仮定を利用して、式 (1) の簡略化を試みる。まず、仮定 ④より、式 (1) を次のように近似できる。

$$\rho_{bd} \approx \rho_s \frac{1}{\sqrt{\cos \theta_i \cos \theta_r}} \cdot \frac{\exp(-\tan^2 \theta_H \cdot \cos^2 \phi_H / \alpha_x^2)}{4\pi \alpha_x \alpha_y} \quad (2)$$

次に、仮定 ①、②、③、⑤、⑦より、

$$\rho_g = \rho_s \frac{1}{\sqrt{\cos \theta_i}} \cdot \frac{1}{4\pi \alpha_x \alpha_y} \quad (3)$$

として定数をまとめることで、

$$\rho_{bd} \approx \rho_g \exp(-\tan^2 \theta_H \cdot \cos^2 \phi_H / \alpha_x^2) \quad (4)$$

となる。ここで、 ρ_g は素材の鏡面反射率と溝の設計、入射光の天頂角に依存した係数となる。さらに、仮定 ②、⑥、⑦、⑧より、

$$D = \tan^2 \theta_H / \alpha_x^2 \quad (5)$$

として定数をまとめることで、

$$\rho_{bd} \approx \rho_g \exp(-D \cdot \cos^2 \phi_i) \quad (6)$$

となる。ここで、 D は溝の設計と入射光の天頂角に依存した非負の係数となる。

式 (6) は、平行溝の媒体について、入射光の方位角 ϕ_i に依存した反射率の変化を 2 つのパラメータで近似できることを示している。ここで ρ_g は反射率に線形に作用するが、 D は非線形に作用する。

$\rho_g = 1.0$ とした場合の反射率の変化をグラフに表示したものを図 3 に示す。図 3 より、

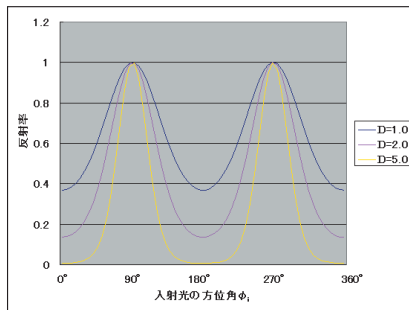


図 3 方位角変化による反射率変化 (モデル)
Fig. 3 Reflectance depending on azimuth (model).

反射率は $\phi_i = 90^\circ, 270^\circ$ にて最大, $\phi_i = 0^\circ, 180^\circ$ にて最小となること, 異方性反射の鋭さが D に依存することが確認できる.

2.3 実際の平行溝の反射特性

ここではエンボス加工と印刷により媒体に平行溝を加工し, 任意の入射・反射方向の画像を撮影できる光学特性測定装置 (デジタルファッション社製 OGM-3) によって反射率の変化を測定することで, 導出した反射モデル (6) の妥当性を検証する. エンボス加工の試料として, まず銅板に幅 $60 \mu\text{m}$ の多数の溝を $30 \mu\text{m}$ 程度の深さでエッチングして母型を作製し, 黒色のポリ塩化ビニル製シートに熱と圧力でエンボス加工した. また印刷の試料として, $100 \mu\text{m}$ の間隔において $100 \mu\text{m}$ の幅で高粘性の透明な紫外線硬化性樹脂を用いて黒色のコート紙に印刷を行った. 通常の印刷では被印刷面に凹凸を形成することはできないが, 紫外線硬化性樹脂は被印刷面への転移直後に紫外線を照射することで表面張力により厚みを保ったまま硬化し, 結果として凹凸を形成できる.

入射光の方位角を変化させながら試料を正面から撮影し, 相対的な反射率 (平均画素値) の変化をグラフに表示したものを図 4 に示す. 図 4 において入射光の天頂角 $\theta_i = 15^\circ$ のグラフからは, 反射率は図 3 と同様に $\phi_i = 90^\circ, 270^\circ$ でピークを持つこと, 異方性は印刷よりもエンボスが鋭いことが確認できる. これは, エッチングの進行は媒体面全域にわたって均一であるのに対し, 印刷面では樹脂の厚みにばらつきが生じ, 式 (5) において α_x が増大することで D が小さくなるためと考えられる. エンボス試料の例では, 入射光の天頂角が大きくなるにつれ, ピークの反射率 ρ_g は低下する一方, 異方性が鋭くなる傾向が読み取れる. また, 印刷試料ではエンボス試料と比較して, 入射光の天頂角の増大により急激に

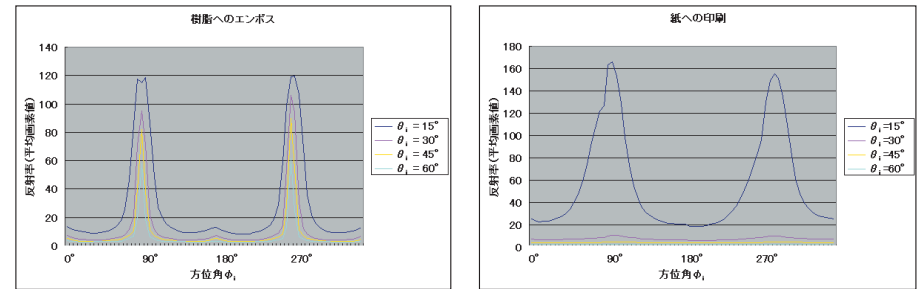


図 4 方位角変化による反射率変化 (実測)
Fig. 4 Reflectance depending on azimuth (measured).

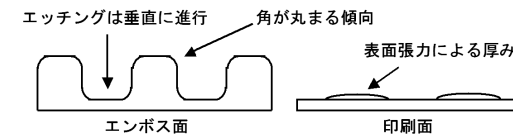


図 5 試料断面の模式図
Fig. 5 Cross section.

表 1 実測値に対するパラメータ D の推定結果
Table 1 Estimated parameters D .

θ_i	エンボス (誤差)	印刷 (誤差)
15°	11.56 (8.7%)	3.50 (13.0%)
30°	48.85 (5.9%)	0.61 (9.5%)
45°	97.38 (5.3%)	0.21 (5.3%)
60°	149.87 (5.4%)	(推定不能)

反射率が低下するが, これは図 5 のように印刷面では法線の天頂角が大きい微小面が少ないためと考えられる. 最小二乗法による D の推定結果と, ρ_g を 1 として正規化した場合の 1 測定サンプルあたりの平均誤差を表 1 に示す. また, $\theta_i = 15^\circ$ での実測値と推定した D によるモデルの反射率変化を図 6 に示す. 反射率の変化はおおむね近似できている一方で, 実測した反射率の最小値が 0 にならない違いがあるが, 物理的な加工により溝の方向性が理想的でなく, 仮定 ④ が完全には成立しない結果と考えられる.

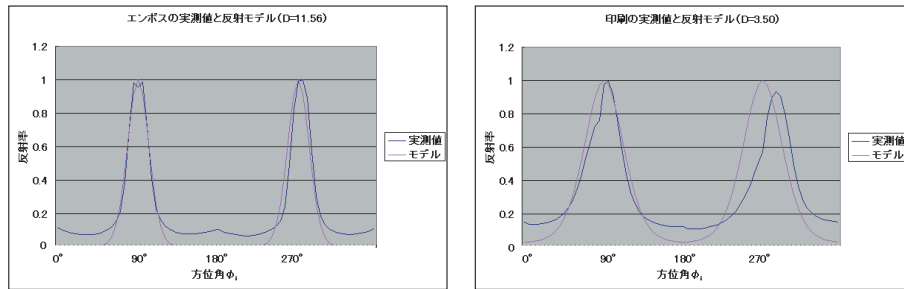


図 6 反射率の実測値と反射モデルの比較
Fig.6 Comparing measured reflectance with model.

3. 法線情報の溝角度への継承

溝の集合で形成された異方性反射媒体では、光の照射方向に依存する反射率は溝の走行方向に支配される。一方、3次元空間上の物体では、表面を均質な等方性反射特性と仮定すると、光の照射方向に依存する反射率はその点における法線方向に支配される。ここには、3次元空間における法線分布と、異方性反射媒体における溝方向の分布には、照明方向に依存した反射を支配する共通性が見い出せる。これより、3次元の法線分布を何らかの規則に基づいて溝角度に継承することで、3次元空間で照射光の向きを変化させた場合の反射像の変化を媒体上で表現できることが予測される。本章では、表面が平滑で Phong の鏡面反射モデルに従う目標レリーフが入射光の天頂角に依存して見せる輝度変化を、表面が溝で充填され Ward の異方性反射モデルに従う擬似レリーフへ入射光の方位角を変化させることで近似できることを示す。

3.1 単純な曲面の法線と溝角度の関係

ここでは円筒面を例に、退化二次曲面の見せる反射の変化を溝による異方性反射で近似できることを示す。円筒面のような退化二次曲面では曲面上のすべての法線ベクトルが単一の平面に含まれる。図 7 に示す y 軸に中心軸を持った円筒では、法線ベクトルは xz 平面に含まれ、天頂角 θ_N のみで表現できる。ここで同様に xz 平面内で任意の天頂角方向から入射する平行光線に対し、円筒面から z 軸上の観察方向への鏡面反射強度を考察する。

Phong の鏡面反射モデルにおいて、光線方向に依存した反射率 ρ_p は次式で表される。

$$\rho_p = k_s \cos^n \gamma \tag{7}$$

ここで k_s は鏡面反射係数、 n は鏡面反射指数で反射の鋭さを表す。また、 γ は視線と正入射

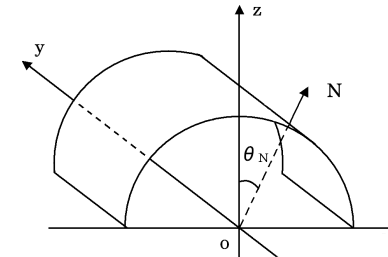


図 7 円筒面における法線ベクトル
Fig.7 Normal vector on cylinder surface.

射方向のなす角度であり、z 軸正方向に視点を置くと、

$$\gamma = 2\theta_N - \theta_i \tag{8}$$

となる。これにより式 (7) は次のように表される。

$$\rho_p = k_s \cos^n (2\theta_N - \theta_i) \tag{9}$$

表面の鏡面反射係数 k_s を一定とすると、

$$\rho_p \propto \cos^n \{2(\theta_N - \theta_i/2)\} \tag{10}$$

となり、反射率は法線と入射方向の関係に依存する。

次に図 7 で xy 平面の各点において、法線の天頂角 θ_N をそのまま溝の方位角 G に継承して媒体に溝を形成することを考え、その反射が円筒面の反射像を近似することを示す。ただし天頂角のとり範囲が $\pm 90^\circ$ であるのに対し、2つの溝のとり角度の最大値は 90° であるため、

$$G = \theta_N/2 \tag{11}$$

とする。このことと式 (6) より、

$$\rho_{bd} \approx \rho_g \cdot \exp \left\{ -D \cos^2 \left(\frac{\theta_N}{2} - \phi_i \right) \right\} \tag{12}$$

となる。媒体の反射係数および媒体への入射光の天頂角を一定にすると、反射率は入射光の方位角のみに依存し、

$$\rho_{bd} \propto \exp \left\{ -D \cos^2 \left(\frac{\theta_N - 2\phi_i}{2} \right) \right\} \tag{13}$$

となる。

式 (10) および (13) による反射率の変化を図 8 に示す。ここでは、反射率の変化が入射

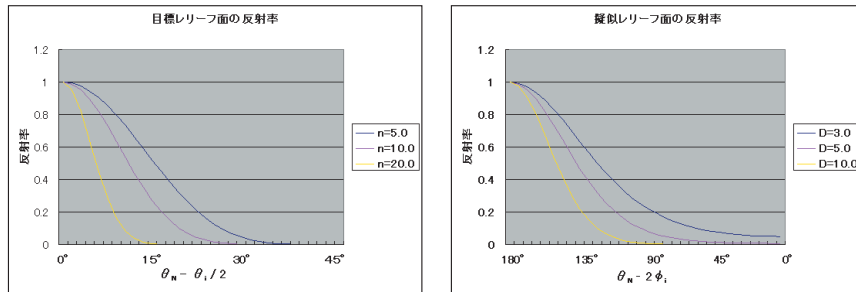


図 8 レリーフ面の反射率変化

Fig. 8 Reflectance variance on relief surfaces.

光の天頂角と方位角に依存する違いはあるが、最大値を示す条件からの乖離に対して単調減少であり、1つの変曲点を持つという共通性が確認できる。目標レリーフ面では n が、擬似レリーフ面では D が反射率の特性に作用し、2章で媒体を測定した $D = 11.56$ 、 $D = 3.50$ に対して最小二乗法によるパラメータ推定を行った結果、それぞれ $n = 21.85$ (1サンプルあたりの平均誤差 0.56%)、 $n = 5.69$ (平均誤差 3.50%)を最も近似することが分かった。

以上より、目標レリーフにおいて入射光の天頂角に依存した鏡面反射強度の変化を、擬似レリーフにおいて入射光の方位角に依存して近似的に表示できること、表示される鏡面反射の鋭さは媒体に形成した溝の微細形状によることが分かる。図8は入射光が一定の場合の法線や溝角度に依存した輝度変化も示しており、目標レリーフにおける法線方向の変化に応じた反射強度の変化も擬似レリーフで近似することを意味する。擬似レリーフ面の反射率は、0へ収束する特性が目標レリーフと異なるが、目標像に対する反射強度は単調かつ非線形の濃淡補正を施した結果に相当し、コントラストは異なるものの同一の形状として知覚可能な像が表示できると考えられる。

3.2 法線投影による溝角度への変換

前節では単純な退化二次曲面を対象として考察したが、一般的な曲面では法線ベクトルは天頂角と方位角の双方で変化する。本節ではより一般的な曲面の反射を近似するための溝角度の決定方法を提案する。3次元形状に対して通常のレンダリングと同様に投影面を設定する。法線方向は投影面上の方位角と天頂角で特定され、位置の関数 $(\theta_N(x, y), \phi_N(x, y))$ で表される。一方、媒体上の溝方向は方位角のみで特定され、これを $G(x, y)$ で表す。2変数の法線情報を1変数の溝角度に完全に継承することは不可能であり、反射を近似する合理的

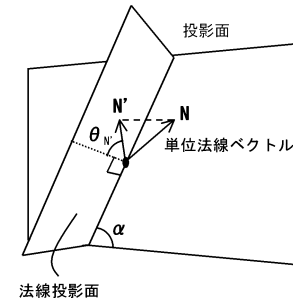


図 9 法線を投影した天頂角への変換

Fig. 9 Converting a normal into a zenith.

な変換が必要となる。

ここで、法線を特定の方位角に投影することで天頂角成分を優先して継承することを考える。このために、図9に示すように、投影面に垂直で原点を通過し、かつ投影面上の基準方向から任意の方位角 α で設置した第2の投影面を定義する。これを法線投影面とよび、

$$y = \tan \alpha \cdot x \quad (14)$$

で表される。投影面上の単位法線ベクトル $N(\theta_N, \phi_N)$ を法線投影面に鉛直に投影すると、投影像 N' は法線投影面に含まれ方位角は α に一致し、天頂角 $\theta_{N'}$ は、

$$\theta_{N'} = \tan^{-1} \{ \tan \theta_N \cdot (\cos \alpha \cdot \cos \phi_N + \sin \alpha \cdot \sin \phi_N) \} \quad (15)$$

で表される。ここで加法定理により右辺を整理すると、

$$\theta_{N'} = \tan^{-1} \{ \tan \theta_N \cdot \cos(\alpha - \phi_N) \} \quad (16)$$

となり、 $\theta_{N'}$ は $-\pi/2 \leq \theta_N \leq \pi/2$ の範囲をとる。一方で2つの溝のなす角度の最大値は 90° であり、計算された天頂角の相違を溝角度の相違に線形に反映させるため、この位置における溝の方位角 G を次式で決定する。

$$G = \theta_{N'}/2 \quad (17)$$

以上の操作を投影面上のすべての標本点において実施し、各標本点での溝方位角を算出することにより、溝方位角の場が離散的に決定できる。

3.3 変換処理の妥当性

目標レリーフ像を擬似レリーフにおいて発現させるための、上記変換の妥当性を考察する。目標レリーフ面における法線の方位角 ϕ_N が法線投影面の方位角 α に一致している場合、法線と溝の関係は3.1節での考察と等価となり、目標レリーフの反射が近似できる。

目標レリーフ面で任意の方位角を持つ単位法線ベクトルでは、式 (16) に示すように、 ϕ_N と α のなす角 $\Delta\phi$ に応じて投影した天頂角 $\theta_{N'}$ が θ_N から単調減少する。これは、法線ベクトルに対する $\Delta\phi$ の増加に応じて、光が入射する方位角方向の成分の勾配が大きくなることを定量的に反映している。同時に、投影により法線投影面に直交する成分が失われ、ノルムが $\sin^2 \theta_N \cos^2 \Delta\phi + \cos^2 \theta_N$ に減少する。投影後のノルムは、その法線方向が方位角 α で入射する光線に対する感応率を示している。これより、 $\theta_{N'}$ に基づいた溝角度と、ノルムの減少に基づいた反射効果の減衰を継承すれば、 $\phi = \alpha$ で天頂角を変化させた照明による反射の変化を近似できる。ただし、異方性反射の効果有感応率に比例させるためには、素材自体の鏡面反射率を空間的に変化させる必要があり、実現が困難なため以降の実験では考慮しないこととする。

4. 溝のパターン生成

前章で提案した手順により得られた溝角度分布から溝のパターンを生成し、その見え方を検証する。ここでは溝角度のみを考慮し、ノルムの減少を無視する。これにより法線の方位角の相違が考慮されないが、法線や光線の天頂角変化に応じた輝度変化の単調性は維持でき、レリーフ面の知覚が可能になることが期待できる。

4.1 溝の生成と実体化の方針

3.2 節の手順で定義した角度分布に従った溝パターンを生成し、2次元の画像を版下として保持すれば、エッチングや印刷などの手法で凹凸として実体化できる。ここでは版下の生成手順として、溝の角度を直線群により近似して生成する手法と、角度分布に忠実に曲線でトレースする手法の2つを提案する。

4.2 直線を用いた版下生成

ここでは以下のステップで版下画像を生成する。

- ①媒体平面を微小な領域（セル）に分割する。個々のセルは肉眼で確認できないサイズであることが望ましいが、溝の実体化プロセスや複製プロセスの精度を考慮して、加工可能なサイズに設定する。セルの形状は任意であるが、対象領域全体を均等にカバーするためにここでは正方形とする。
- ②各セル位置に対応する溝角度を取得する。各セルの代表点として、たとえばセルの重心の座標に関し、離散的に定義されている $G(x, y)$ に対して2次元の補間を用いて対応する角度を定める。
- ③個々のセル内部を、取得した角度を持つ直線群で充填する。

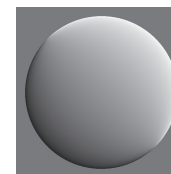


図 10 溝角度分布例

Fig. 10 A distribution of groove angle.

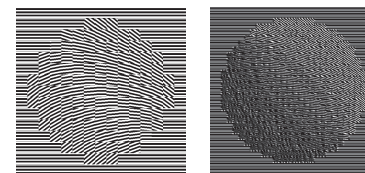


図 11 直線を用いた版下と反射予測

Fig. 11 A black copy made up of straight lines and an expected reflection.

図 10 に半球を 3.2 節に記載の手順により $\alpha = 45^\circ$ で変換した溝角度分布を、図 11 にこの分布から生成した版下の例と、版下を凹凸として実体化した媒体での反射をバンプマッピングによりレンダリングして予測した例を示す。図 10 では各位置における溝角度を画素の濃淡により示している。図 11 に示した版下ではセル境界に不連続を生じるが、巨視的には角度分布を近似した直線群が得られている。また反射予測例では半球を知覚できる濃淡分布が確認できる一方、セルがモザイク状に現れている。

4.3 曲線を用いた版下生成

直線群の版下ではセル境界に角度の不連続を生じるが、領域全体を溝角度に従った曲線群で充填できれば、連続性を維持した溝を生成できる。ここでは、Vector plot とよばれる手法¹⁰⁾を用いて、以下のステップで曲線群により版下を生成する。

- ①領域全体に一定の間隔で基準点を配置する。その後、規則性を回避するために、基準点を一定の範囲でランダムに移動する。
- ②基準点における溝角度を取得し、取得した角度で基準点から一定間隔離れた点を新たな端点とする。基準点と端点を1区間とする。
- ③新たな端点における溝角度を取得し、取得した角度でこの端点から一定間隔離れた点を次の端点とする。2つの端点を1区間とする。
- ④区間の総延長が規定の長さに達するまで新たな端点を定義する。

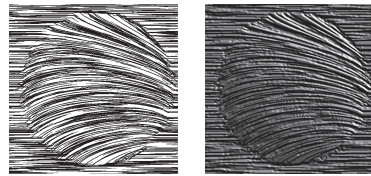


図 12 曲線を用いた版下と反射予測

Fig. 12 A black copy made up of curved lines and an expected reflection.

- ⑤基準点と端点群を制御点列とし，スプライン補間により曲線の骨格を得る．
- ⑥曲線の骨格に幅を付与しながらラスター展開し，1本の曲線を描画する．
- ⑦すべての基準点に対して，上記手順で曲線を生成，描画することで，対象領域全体について溝角度をトレースする曲線群が完成する．

図 12 に，図 10 の角度分布より生成した曲線群の例とバンプマッピングによる反射予測例を示す．この版下では曲線群にて角度分布をより忠実に継承している一方，隣接する曲線の間隔が不安定で予期せぬ隙間や塊が生じている．反射予測例ではモザイクのない半球が知覚できるが，隙間や塊がレリーフ像の滑らかさを損なっている．

5. 実験結果

提案した手法を用いた立体表示の有効性を検証するために，実際にモデリングから溝角度への変換，版下の生成，実体化を行い，図 13 に示すようにエンボス加工と印刷によって媒体を試作した．表現する対象としてティーポットの形状を，また背景として投影面に平行な平面を設置した．媒体のサイズは高さ 105 mm，幅 148 mm とし，法線投影面の角度 $\alpha = 135^\circ$ で溝角度を計算した．

5.1 エンボス加工による立体表示

まず解像度 2400 dpi で曲線群の最大幅を $60 \mu\text{m}$ として版下を生成した．この版下をフォトリソグラフィにより $30 \mu\text{m}$ の高低差として銅板上に実体化し，これを原型として黒色のポリウレタンフィルムにエンボス加工した．図 14 に，蛍光灯スタンドによって試作品の左方，上方，右方から光線を照射して撮影した写真と，Phong の反射モデルで 3.1 節で推定した $n = 21.85$ を用いて， 135° の方位角で平行光線の天頂角を変化させてレンダリングした画像を示す．試作品ではスタンドによるスポット光の照明のため入射光の方位角に広がりがあり，目標レリーフに照射する光の天頂角にも対応した広がりを持たせた．ここでは，媒体上に発現した擬似レリーフでティーポットの形状が知覚できること，方位角 135° で天頂角が

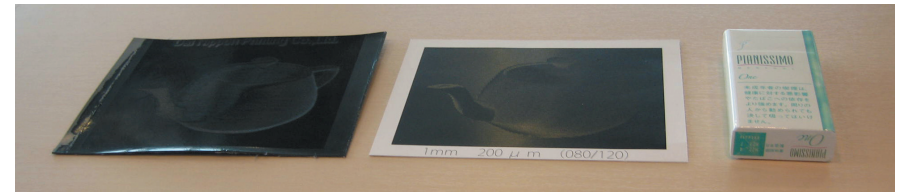


図 13 エンボス（左）と印刷（中）による試作品

Fig. 13 Prototypes by embossing (left) and printing (center).



図 14 エンボスによる像（上）とレンダリング例（下）

Fig. 14 Appearances of an embossed sample (upper) and rendered images (lower).

変化する照射光による目標レリーフのハイライト位置の左上から右下への移動が，擬似レリーフに照射する光線の方位角変化によっても現れていることが確認できる．一方，試作品とレンダリング像では試作品で斜めの反射が目立つように反射像の形状に相違が認められる．

5.2 印刷による立体表示

次にシルクスクリーン印刷により，黒色の紙に紫外線硬化樹脂で溝パターンを凸状に実体化した．まず前節と同一の版下（曲線群）を用いて印刷した．実験では樹脂の表面張力や粘性を調整したが，曲線の間隔が一定でないため，印刷面で隣接する曲線の接合が生じ，安定した印刷ができないことが判明した．一方，直線群では溝の間隔が一定であり，この問題を回避することができた．

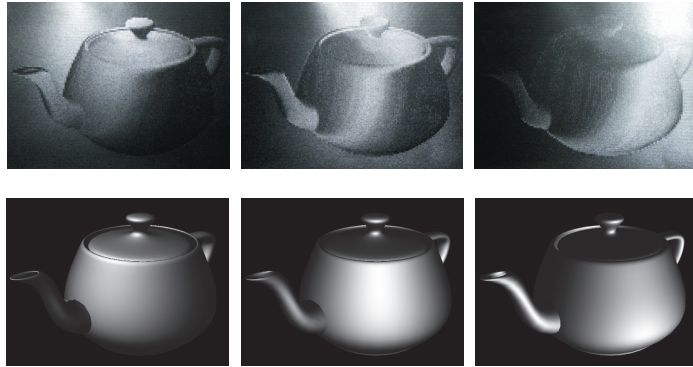


図 15 印刷による像 (上) とレンダリング例 (下)

Fig. 15 Appearances of a printed sample (upper) and rendered images (lower).

図 15 に直線群の版下を用いた印刷結果と Phong の反射モデルによりレンダリングした比較画像 (3.1 節で推定した $n = 5.69$ を使用) を示す. ここでは領域全体を 1 mm 四方の正方形に分割し, 直線の幅を $80\ \mu\text{m}$, 間隔を $120\ \mu\text{m}$ として解像度 $2400\ \text{dpi}$ で版下を生成した. この結果, 図 14 の場合と同様に擬似レリーフの発現, および光線の照射方向の変化によるハイライト位置の変化が確認できた. 3.1 節で予測したように, ティーポットの側面などにおいて, エンボス加工の場合よりも鈍い鏡面反射が表現されている. 一方, セルの境界が反射の相違として知覚され, 個々のセルがモザイクとして現れている. 特に輪郭付近や曲率の大きい部分, すなわち法線ベクトルの変化が激しい部分では違和感が大きい.

5.3 ハイライト形状の相違に関する考察

図 14, 図 15 から分かるように, 試作品と参照画像ではハイライトの形状に相違が見られる. 顕著な例としては, 図 14 中央のように参照画像には見られない斜めに強く光るハイライトが現れる. ここで試作品に用いた溝の角度分布を濃淡で表現した画像と, 分布を観察しやすくするために 12 階調に再量子化した画像を図 16 に示す. また図 17 にこの変換における投影ベクトルのノルム分布を表す画像と, 12 階調に再量子化した画像を示す. 図 16 からは角度の近い溝が試作品のハイライト形状に見られる領域に沿って配列していることが分かる. 溝角度の近い領域は特定の照明下で近い輝度を示すため, 試作品のハイライト形状が図 16 の分布に沿っているものであることが分かる. 図 17 には, 試作品が参照画像と比較して明るい領域ほど, おおむねノルムが小さいことが示されており, 目標とするレリーフ



図 16 溝の角度分布 (左) と 12 階調化画像 (右)

Fig. 16 Distribution of azimuth of grooves (left) and the 12-level image (right).



図 17 投影ベクトルのノルム分布 (左) と 12 階調化画像 (右)

Fig. 17 Distribution of norm of projected vector (left) and the 12-level image (right).

像により近い像を得るためには, 3.3 節で考察したようにベクトル投影後のノルムの減少を考慮した反射率の制御が必要であると考えられる.

ハイライト形状が異なる他の要因として, 試作品に照射する光線が理想的な平行光ではなく蛍光灯スタンドによることも影響していると考えられる. たとえば図 14 の左図では, 擬似レリーフでティーポットの蓋が参照画像よりも高い輝度を示しているが, この部分に入射する光の天頂角が小さくなったため, 式 (6) における D の値が小さく, ρ_g が大きくなり, 本体部分と比較して高い反射率となった結果であると考えられる.

5.4 版下生成方式に関する考察

直線群と曲線群による版下は, どちらも意図した立体形状を表示できるが, 表現性や加工適性の観点から異なった適正を持つと考えられる.

表現性の観点からは, 曲線群による版下が好ましい. 直線群による版下では, セル境界における溝角度の不連続性に起因して, モザイク状のちらつきが観察される. 曲線群では領域全体で溝角度が連続性を保っており, ちらつきによる違和感はない.

加工適性の観点からは, 直線群による版下が望ましい. 曲線群による版下では, 複数の曲線の塊や空虚部が生じ, 特に印刷による実体化では, 曲線の間隔が一定でないためにインキの融合が避けられず, 安定した加工が困難である. 直線群による版下では加工手段に応じた適切な幅と間隔で溝を生成できる.

また、曲線群による版下を利用した媒体表面では有機的な印象の質感が得られるのに対し、直線群による版下では人工的な印象となる。このことより、アパレル製品や家具など自然な印象が好まれる物品の装飾に利用するには曲線群による版下が、広告やパッケージなどアイキャッチ効果が要求される用途では直線群による版下が適すと考えられる。

6. おわりに

本論文では、3次元空間にモデリングされた立体形状の法線ベクトル情報を利用して、物体表面に付与する溝の向きを決定することにより、異方性反射を形成し、元の立体形状が示す反射の変化を表示する方法を提案した。本手法によるレリーフ像の表示には溝の向きの分布が支配的であり、個々の溝の微細形状の影響は小さい。このため、安価な加工手段で大量複製が可能であり、幅広い工業製品への表面加飾に利用が期待できる。また、微小な凹凸のみで大きな奥行きを知覚が可能のため、運送や容積効率の問題がなく実用性が高い。

一方、表現する物体や表示媒体として用いる素材には一定の制約を受ける。本手法では物体の法線情報だけを利用しているため、透過・屈折などの現象や、テクスチャなど物体表面の反射特性の変化は表現できない。また、媒体からの鏡面反射を利用して表示を行うため、媒体には十分な光沢を持つ素材を用いることが必要となる。印刷による場合は、光沢がある樹脂をインキとして用いる必要がある。また、鏡面反射光のみで像を表示するため、背景が明るい場合には十分な視覚効果が得られない。以上より、本手法には濃色で光沢がある素材を用いることが望ましい。

今後の課題として、溝パターン生成手法の改善があげられる。まず、曲線群による版下では、曲線の幅や隙間を一定に保つことが望まれる。Mebarkiら¹⁰⁾はVector plotにおける曲線の合理的な配置手順を提案しているが、隙間の幅を連続的に維持できないという課題を残している。Turkら¹¹⁾は生成した曲線の漸次的な修正方法を提案しているが、高解像度の版下生成には演算負荷が高く、演算効率の改善を要する。Saitoら¹²⁾はテーパリングにより曲線群の見かけの密度を均一にできることを示したが、線や隙間の幅を一定にする課題は解決できない。曲線の偏りは、溝の流れのベクトル場の発散が不均一で、湧出や流入が生じることに起因しており、抜本的な解決は困難と予想される。他方の直線群による版下では、セル境界での溝角度が不連続になることで、好ましくないモザイクが発現する。これには表現対象の形状を考慮した適応的な領域分割により視覚上の違和感を低減できると考える。2次元画像を対象にした適応的な領域分割¹³⁾は報告されているが、3次元形状の曲率変化や視点との関係による稜線の抽出¹⁴⁾などを利用して、エッジやリッジを抽出し、優先的に

セル境界とすることで違和感が軽減できると考える。また、より正確な反射像の表示のため、3.3節で指摘した投影ベクトルのノルムを媒体に継承する必要がある。これには溝の充填密度をノルムに比例させることで、方位角に依存した感応性を近似的に擬似レリーフ媒体に反映させる可能性があると考えられる。

本研究では、媒体を正面から観察した場合に、照射する光の方位角の変化に応じた像の変化を考察し、実験によってその効果を確認した。入射光の天頂角を変化させた場合には、2.3節の反射特性計測結果からも分かるように、反射像の相対的な輝度が変わるためコントラストの変化が生じるが、明暗の逆転は生じないためレリーフ像の知覚は可能であることが分かる。ただし印刷サンプルの例のように、溝の加工条件によっては天頂角の増大にともなって異方性反射の効果が消滅するため、像の表示に必要な照明条件は制約を受けることが分かる。一方、正面以外から媒体を観察した場合も、図13の写真からも分かるように特定の条件では擬似レリーフ像の発現が確認できるが、本研究で簡略化した式(6)の反射モデルでは任意の入射方向と観察方向の組合せに対する像の変化を考察できていない。これらを正確に論ずるためには任意の入射方向と観察方向の組合せによる反射特性(BRDF)と目標レリーフの関係に対応付けることが必要となり、今後の課題としたい。

参考文献

- 1) Weyrich, T., Deng, J., Barnes, C., Rusinkiewicz, S. and Finkelstein, A.: Digital Bas-Relief from 3D Scenes, *Computer Graphics*, Vol.24. No.4 (2007).
- 2) Blinn, J.F.: Simulation of Wrinkled Surfaces, *Proc. ACM SIGGRAPH 1978*, pp.286-292 (1978).
- 3) Nicodemus, F.E., Richmond, J.C., Hsia, J.J., Ginsberg, I.W. and Limperis, T.: Geometric considerations and nomenclature for reflectance, Monograph 161, National Bureau of Standards (US) (1977).
- 4) Ashikhmin, M., Premoze, S. and Shirley, P.: A Microfaced-based BRDF Generator, *Proc. ACM SIGGRAPH 2000*, pp.65-74 (2000).
- 5) Weyrich, T., Peers, P., Matusik, W. and Rusinkiewicz, S.: Fabricating Microgeometry for Custom Surface Reflectance, *ACM Trans. Graphics*, Vol.28. No.3, Article 32 (2009).
- 6) Yokoi, S. and Toriwaki, J.: Realistic Expression of Solid with Feeling of Materials, *JARECT*, Vol.18 (1988).
- 7) Poulin, P. and Fournier, A.: A Model for Anisotropic Reflection, *Computer Graphics*, Vol.24. No.4, pp.273-282 (1990).
- 8) Ward, G.J.: Measuring and Modeling Anisotropic Reflection, *Computer Graphics*,

Vol.26. No.2, pp.265–272 (1992).

- 9) Beaty, W.J.: Drawing Holograms by Hand, *Proc. SPIE-IS&T Electronic Imaging*, Vol.5005, pp.156–167 (2003).
- 10) Mebarki, A., Alliez, P. and Devillers, O.: Farthest Point Seeding for Efficient Placement of Streamlines, *Proc. IEEE Visualization 2005*, pp.479–486 (2005).
- 11) Turk, G. and Banks, D.: Image-Guided Streamline Placement, *Proc. ACM SIGGRAPH '96*, pp.453–460 (1996).
- 12) Saito, T. and Takahashi, T.: Comprehensible Rendering of 3-D Shapes, *Computer Graphics*, Vol.24, No.4, pp.197–206 (1990).
- 13) Di Blasi, G. and Gallo, G.: Artificial Mosaic, *The Visual Computer*, Vol.21, Issue 6, pp.373–383 (2005).
- 14) Judd, T., Durand, F. and Adelson, E.: Apparent Ridges for Line Drawing,

Computer Graphics, Vol.24, No.4 (2007).

(平成 21 年 6 月 18 日受付)

(平成 21 年 12 月 17 日採録)



河合 直樹 (正会員)

1988 年名古屋大学工学部電気学科卒業 . 1990 年同大学大学院工学研究科情報工学専攻修士課程修了 . 同年大日本印刷 (株) 入社 . コンピュータグラフィクス , 画像処理のデザイン応用に関する研究に従事 . 現在 , 大日本印刷 (株) 情報コミュニケーション研究開発センター勤務 . IEEE , ACM SIGGRAPH 各会員 .