JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	3次元形状の特徴を利用した異方性反射によるレリーフ表示の改善
Author(s)	木村，絵里子；河合，直樹；宮田，一乗
Citation	情報処理学会研究報告．グラフィクスとCAD研究会報告，2010-CG-140(5)：1-6
Issue Date	2010-09-01
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	http://hdl.handle.net/10119/11422
Rights	社団法人　情報処理学会，木村絵里子，河合直樹，宮田一乗，情報処理学会研究報告．グラフィクスとCAD研究会報告，2010-CG-140(5)，2010，1-6．　ここに掲載した著作物の利用に関する注意：本著作物の著作権は（社）情報処理学会に帰属します。本著作物は著作権者である情報処理学会の許可のもとに掲載するものです。ご利用に当たっては「著作権法」ならびに「情報処理学会倫理綱領」に従うことをお願いいたします。Notice for the use of this material: The copyright of this material is retained by the Information Processing Society of Japan (IPSJ). This material is published on this web site with the agreement of the author (s) and the IPSJ. Please be complied with Copyright Law of Japan and the Code of Ethics of the IPSJ if any users wish to reproduce, make derivative work, distribute or make available to the public any part or whole thereof. All Rights Reserved, Copyright (C) Information Processing Society of Japan.
Description	

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

3 次元形状の特徴を利用した異方性反射によるレリーフ表示の改善

木村絵理子† 河合直樹† 宮田一乘††

物体表面に微細な溝を付与することで生じる異方性反射により，レリーフ状の立体形状を表現する手法が提案されている．同手法では 3 次元形状の法線ベクトルに所定の変換を施して各位置に付与する溝の方向を求め，規則的な正方形または正六角形に分割された小領域内部に求められた方向の平行な溝を形成することにより，個々の位置からの異方性反射強度の変化が生じ 3 次元的な像を発現する．この手法では小領域境界において溝の方向に不連続が生じるため，反射パターンに小領域の形状が知覚され，特に形状の輪郭（エッジ）や曲率の大きな部分（リッジ）でジャギー状の違和感を生じる．ここでエッジやリッジを境界とするように小領域を生成すれば，見た目の違和感を低減すると期待できる．類似の領域分割は，ノンフォトリアスティックレンダリングの分野でモザイク画生成についての研究で検討されている．本研究では先行研究を改良し，3 次元形状のエッジやリッジなどの特徴に基づき対象面を領域分割することで，違和感のないレリーフ表現法を提案する．

An improved method of relief indication with anisotropic reflection by using 3D features

Eriko Kimura† Naoki Kawai† Kazunori Miyata††

The method for showing relief-like three-dimensional shape onto the surface of objects using anisotropic reflection caused by microscopic grooves formed on the surface has been proposed. The method first converts the normal vector of the original shape into the direction of grooves at each sampling point, and then fills each of square or regular hexagonal cells into which the entire region has been divided uniformly with parallel grooves in the obtained direction. Though the result shows the appearance of the original curved surface by changes in intensity of anisotropic reflection from each of cells, it generates artifacts look like jaggies especially at edges and ridges due to the discontinuity of the orientation of grooves at the borders of cells. It is expected that the artifacts reduce by generating cells which borders contain edges and ridges of original shape. Similar division has been discussed in a study on mosaic image generation in the area of non-photorealistic rendering. In this article, we propose an improved method of showing relief that reduces artifacts by dividing the whole region adaptively to the original geometry by using three-dimensional features such as edges and ridges.

1. はじめに

光線の入射方向や反射方向により反射率が変化する反射特性を異方性反射とよぶ．異方性反射は物体表面の微細な凹凸による法線ベクトルの変化が特定の方向へ偏りを示す場合に現れ，代表的な事例としてはアナログレコード盤や音響機器のつまみのように表面に微細な溝を付与した光沢面があげられる．異方性反射は独特の反射特性が興味深く，写実的なレンダリングの要素技術として CG 分野でも研究の対象となってきたが[1][2]，一方でライターなどの金属製品にみられる光線彫りのように異方性反射を装飾の手法として積極的に活用することも以前より行われてきた．

光線彫りによる装飾技法をより自由に活用するために，河合[3]により異方性反射によるレリーフ表示法が提案されている．ここでは 3 次元でモデリングした形状の法線分布に従って媒体表面に付与する溝の方向を決定し，この方向分布に従って溝を形成すれば，媒体面に対して照射する光線の方位角を変化させることによって，元の 3 次元形状に照射する光線の仰角を変化させた場合の反射の変化を近似することが示されている．この技法を工業製品等の装飾として利用する場合，量産時の加工特性上の制約から，対象面全域を均等に正方形または正六角形の小領域に分割し，個々の小領域内部に所定の向きの平行な溝を形成することが好ましいが，小領域境界における溝方向の不連続性に起因するちらつきが発生するという課題がある．ちらつきは 3 次元形状の輪郭（エッジ）や，曲面上の曲率の大きな部分（リッジ）で目立つため，エッジやリッジが境界となるように，3 次元形状に適応的に小領域を生成することがちらつきの低減に効果的と考えられる．

この考え方と似た領域分割として，Noda ら[4]はタイルなどの小片を寄せ集めて制作するモザイク画を自動的に生成する研究の中で，3 次元形状のエッジとリッジに着目した領域分割法を提案している．ここでは最初に対象物のエッジとリッジを抽出し，これらをガイドラインとして正方形のタイルを配列することで，対象となるモチーフの特徴を損なうことなく，適切にモザイク画へ変換する．この研究ではエッジやリッジを無視してタイルを配置することによる違和感を避けるという課題に着目しているが，この課題自体は異方性反射によるレリーフ表示と同じである．

本研究では，Noda らにより提案されているリッジやエッジに基づいた領域分割法を利用して小領域を生成することで，異方性反射によるレリーフ表示の違和感を改善することを目的とし，レリーフ表示に適用するために必要な領域分割法の改善を行った後，実際に試作を行ってその効果を検証する．

† 大日本印刷株式会社
Dai Nippon Printing Co., Ltd.
††北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

2. 異方性反射によるレリーフ表示

従来提案されている異方性反射によるレリーフ表示手法[1]を用いることで，物理的には非常に浅い溝を加工するだけで見た目には深いレリーフと類似した装飾が可能になる．この手法に関して，異方性反射媒体の作製手順と意匠上の課題を概観する．

2.1 法線ベクトルから溝角度への変換

3 次元形状の表示は媒体に溝を付与することで実現するが，ここでは媒体面の各位置に付与する溝の角度を決定することが必要となる．まず任意の方法でモデリングした対象形状について，通常のレンダリングでは輝度の分布を計算するかわりに，投影面上の各画素位置における法線ベクトルの分布を取得する．次に，図 1 の左図に示すように，投影面に垂直で，かつ投影面の基準方向から方位角 α の傾きを持った第 2 の投影面（法線投影面）を設定する．法線投影面に対して，各画素位置における単位法線ベクトル N を垂直に投影し，投影されたベクトル N'の天頂角 $\theta_{N'}$を求める．$\theta_{N'}$のとり得る範囲は±90°であるが，溝は相互に 90°を成す場合に向きの相違が最大となる．そのため，式(1)で求める G をその画素位置における溝の角度とする．

$$G = \theta_{N'} / 2 \qquad (1)$$

投影面上に配置した半球に対して以上の操作を行った結果を図 1 の右図に示す．ここでは溝角度 G のとり得る±45°の範囲をグレースケールで正規化して表現している．この溝角度分布に従った溝を浅い凹凸として実体化すれば，異方性反射により半球面が知覚されることになる．

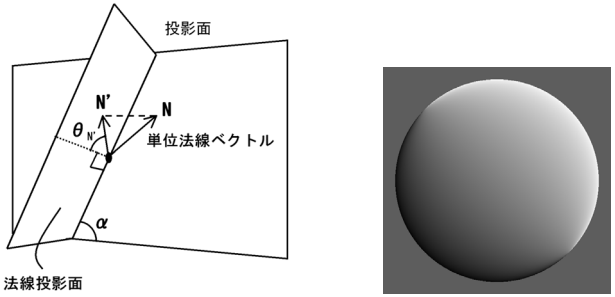

図 1　法線の変換（左）と変換結果（右）
Figure 1　Conversion of a normal vector (left) and a conversion result (right).

2.2 溝角度分布に従った溝パターンの生成

次に求められた溝角度分布に従った溝パターンの版下画像を生成する．まず全領域を規則的に正方形や正六角形などの小領域に分割し，それぞれの小領域の内部に，対応する位置に得られている角度で平行直線群の溝を充填する。この方法では溝の幅と間隔を正確に制御できるが，角度のトレースが離散的なものとなり小領域の境界で溝角度の不連続が生じる．角度の場をより忠実にトレースするために Vector Plot[5][6]を用いて曲線群を生成できるが，溝相互の間隔を制御することが困難で，隣接する溝が接触して塊を形成したり，溝の存在しない空虚が現れる．図 2 に，図 1 と同じ半球面に対して，直線を用いた場合と曲線を用いた場合の版下生成例を示す．

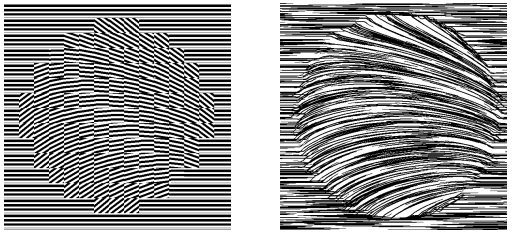

図 2　直線による版下（左）と曲線による版下（右）
Figure 2　Black copies made up of straight lines (left) and curved lines(right).

2.3 異方性反射媒体の作製

溝の集合による異方性反射特性は，主として溝の走行方向に依存して決まり，個々の溝の断面形状からの寄与は比較的小さい．このため，異方性反射媒体の量産においては特別に高精度な加工手段は必要とせず，あらかじめエッチング等によって版下パターンを金型等に実体化しておき，一般的なエンボス加工機械を用いた量産が可能である．特に箔押し加工にて複製すると，紙に対して金属箔を圧着しながらエンボス加工を行うため，異方性反射に必要な表面輝度が向上し，好適である．

図 3 に花をモチーフとしたデザインを用いて，箔押し加工で作製した異方性反射媒体を複数の照明環境で撮影した例を示す．図 3 からは反射光により花の形状が発現していること，与える照明環境により光沢の現れる領域が移動し，立体形状へ照射する照明が変化している場合と類似した見え方が再現できていることが確認できる．

図 3　箔押しによる試作品の見え方
Figure 3　Appearances of a foil stamped sample.

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

2.4 版下方式による違いと課題

実験により，直線による版下と曲線による版下では共に対象とした立体形状の表示が可能であるが，細部に見え方の相違があることが確認されている．直線による版下から作製した異方性反射媒体では，小領域の境界が溝角度の不連続による輝度の差となって現れてジャギー状の違和感を生じる．これは小領域を視認できない程度に小さくすれば回避可能であるが，加工精度上の問題があり実用上は困難である．曲線による版下から作製した媒体では滑らかな曲面が表現できるが，溝の塊や空虚が平滑な鏡面となり好ましくないざらつきとなって現れる．また曲線の間隔が不均一性であることが加工上の制約となり，量産の観点からは好ましくない．以上の考察から，量産品の装飾として活用するためには，直線による版下を用いることが望ましく，小領域境界に現れる輝度の不連続を低減することが望まれる．これには元の 3 次元形状の輝度変化が激しい部分，すなわちエッジやリッジを優先して小領域境界とすることが有効であると予測できる．

3. 立体形状に適応的な領域分割

小領域の集合で構成された芸術表現のひとつとしてモザイク画があげられる．実際のモザイク画制作では，デザインの輪郭などを抽出した下絵を描き，この下絵に沿ってタイルを敷き詰めることが行われる．CG の分野でもモザイク画を自動生成する研究[7][8]が行われているが，ほとんどは 2 次元画像を入力対象としている．ここでは 3 次元形状の特徴を活かして，適応的にタイルを配置する手法[4]について概観する．

3.1 エッジとリッジの抽出

実際のモザイク画制作と同様に対象とするデザインのエッジやリッジに沿ってタイルを配置するために，対象の 3D モデルの法線マップと深度マップを利用する．図 4 に 3D モデルの法線マップと深度マップの例を示す．ここで法線マップでは各画素における法線ベクトルの XYZ 値を RGB 値で，深度マップでは各画素における深度値をグレースケールで表示している．

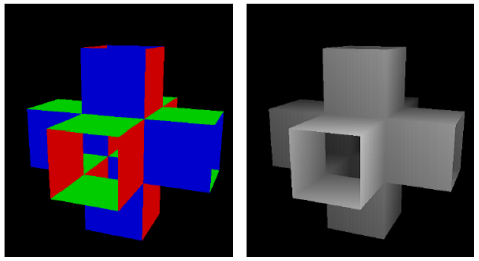

図 4　法線マップ（左）と深度マップ（右）
Figure 4　A normal map (left) and a depth map (right) of a 3D model.

次に 3D モデルのリッジとエッジを抽出する．エッジは背景と物体の境界や物体の重なり部分に現れ，深度マップにラプラシアンフィルタを適用することで抽出できる．ただし図 5 の左図に示したように，メッシュの接合部においては 2 つの面の境界が抽出できない．一方，リッジは面の曲率が大きい部分と解釈することができ，法線ベクトルの変化が激しい部分を抽出することで得られる．法線マップにラプラシアンフィルタを適用し，リッジを抽出した例を図 5 の中央図に示す．この方法では複数の面が同じ向きで重なる部分では境界の抽出ができないが，これはエッジとして抽出できている．また，深度マップから抽出できなかった接合部のエッジは，リッジとして抽出されている．これら 2 つの抽出結果は相互に補完しているので，両者を合成することで全てのエッジとリッジが抽出できる．以降，抽出されたエッジとリッジをまとめて，特徴ラインとよぶ．

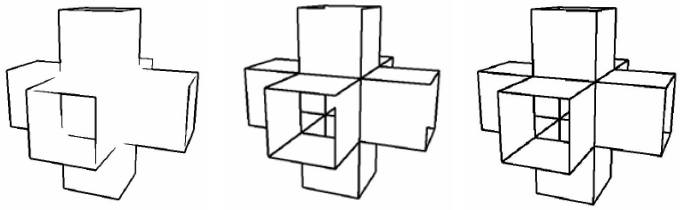

図 5　抽出されたエッジ（左）とリッジ（中），その合成（右）
Figure 5　Extracted edges (left) and ridges (center) and combination (right).

3.2 タイルの配置方法

実際のモザイク画の制作においては，最初に特徴ラインに沿って一列にタイルを配置する．この帯状のタイル群の片側の側面は特徴ラインに沿っており，他方の側面は連なって新たにラインを形成する．次にこの新たなラインに沿って，2 列目のタイル列を配置する．この手順を繰り返すことにより，作品面はタイルで充填されていくが，結果として特徴ラインに沿った幾重かの帯状のタイル列を示すことが多い．別言すると，特徴ラインに沿って形成された帯状の領域内部をタイルで充填したことと同等である．

これに倣って特徴ラインに基づいてタイル中心を配置するためのガイドラインを作成し，ガイドライン上にタイルを配置する．ここで配置するタイルを一辺が同一サイズ 2t の正方形であるとすると，特徴ラインに最も近接したガイドラインは特徴ラインから t の距離にあり，その他は隣接のガイドラインから 2t の位置となる．そこで，まず特徴ラインからの距離マップを作成し，等距離の点を接続することでガイドラインを作成する．図 6 に生成した距離マップとガイドラインの例を示す．

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

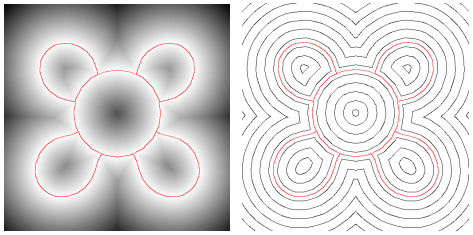

図 6　距離マップ（左）とガイドライン（右）
Figure 6　A distance map (left) and generated guidelines (right).

3.3　モザイク画の制作例

図 7 に上述の手順を用いてモザイク画を生成した例を示す．左より，元となる 3D モデル，抽出した特徴ライン，生成したガイドライン，タイル配置結果をそれぞれ示している．タイルはガイドライン上に鎖状に配置するが，個々のタイルが重ならないように$2\sqrt{2}t$の間隔で配置点を置き，この配置点上にタイル中心を一致させる．また，タイルの向きはガイドラインに正方形の一辺が平行になるように配置する．最終結果のタイルには，形状の法線ベクトルに応じた着色を施している．

最終結果からは対象物体のエッジやリッジに沿ってタイルの配列が行われ，手作業によるモザイク画生成に見られる帯状のタイル列を持つ特徴が再現できていることがわかる．任意の帯領域に隙間なく正方形を配置することは不可能であり，タイルには隙間があるが，これはモザイク画の目地に相当する．

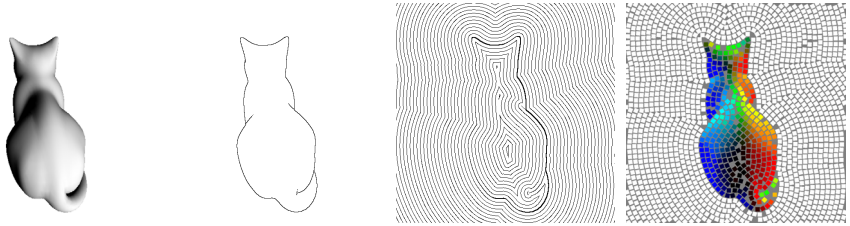

図 7　3D モデルからのモザイク画の制作例
Figure 7　An example of mosaic image generated from a 3D model.

4.　提案手法

異方性反射によるレリーフ表示の違和感は，元のデザインのエッジ部やリッジ部で顕著である．これは 3 次元形状のエッジやリッジ近辺では法線方向の変化が激しく，空間的な輝度変化が大きいことが原因である．逆に曲率が小さい部分では，小領域境界に現れる輝度の変化が緩やかで知覚されにくく，違和感は比較的小さい．そこで，境界がエッジやリッジに一致するように小領域を生成すれば，境界での急激な輝度の変化も本来その位置に現れるべきものであるため，違和感が低減されると同時に表示されるレリーフ像が鮮明になると期待できる．

4.1　領域分割の方針

小領域の境界をエッジやリッジに一致させるために, Noda によるモザイク画生成技術にて特徴ラインにタイル列を一致させるアプローチが流用できると考えられる．ただしモザイク画は元来タイルと目地によって構成されているものであり，自動生成におけるタイルの配置では 2 次元空間全域にタイルを充填せず意図的に空虚部の存在を許容している．生成されたタイル領域をそのまま異方性反射媒体の小領域として流用すると，空虚部は小領域への帰属が決まらないため溝の角度を決定することができない．

幾何学的には，特徴ラインに沿わせて，かつ隙間なく空間を充填することは，同一サイズの正方形だけでは不可能であるが，異方性反射媒体では小領域の形状は任意の不定形であることが許容できる．この自由度を利用して，特徴ラインに沿った境界を持ち，かつ空虚を生じない小領域への分割を行うこととする．ここで小領域の面積は意匠性からは小さいほど好ましいが，加工適正の面からは加工精度に依存した下限が存在する．これら意匠と加工性の両面からあらかじめ目標とする面積 s を定める．このとき，生成される小領域は不定形で面積にばらつきが生じるため，s の設定には許容量を考慮する必要がある．また，小領域内部には様々な角度の平行な溝を充填するので，個々の小領域はできるだけ扁平でないことが好ましい．

4.2　領域分割法の改善

小領域への分割の要件は以下の 3 点に集約できる．

① 特徴ラインを小領域境界に一致させる
② 対象とする空間内に隙間なく小領域を充填する
③ 個々の小領域は扁平でなく概ね同一面積とする

これらを満たすために，特徴ラインを抽出後，特徴ラインからの距離に応じて等幅の帯状領域に分割し，さらに各帯状領域を小領域に再分割する，という 2 段階の領域分割を実施する．

4.2.1 帯状領域への分割

Noda の手法を用いて 3D モデルから特徴ラインを抽出した後，距離マップを作成する．ガイドラインの作成時と同様に，特徴ラインから$\sqrt{s}$ごとに等距離のラインを作成する．ここで各等距離ラインは閉ループとなり，2 つの等距離ラインで囲まれた領域は幅が$\sqrt{s}$の帯領域となる．ここで作成したラインを帯境界ラインとよぶ．

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

4.2.2 小領域への再分割

次のステップとして各帯領域の内部を小領域へと再分割する．各帯領域は幅が $\sqrt{s}$ であるので，帯の長手方向に概ね長さ $\sqrt{s}$ となるように再分割することが目標となる．後に小領域内部を溝で充填するためには各画素位置における小領域への帰属が決定すれば良いので，ボロノイ分割を利用して帯領域内部を再分割することとする．ここで新たに各帯領域の中央に等距離ライン（以下，中央ライン）を作成する．中央ラインは特徴ラインからの距離マップを利用して，式(2)で計算される距離 d_k の点を接続することで求めることができる．

$$d_k = (2k-1)\frac{\sqrt{s}}{2} \qquad (2)$$

ここで k は正の整数である．次に中央ライン上に $\sqrt{s}$ の等間隔で点を配置し，これらの点を母点として個々の帯領域内部をボロノイ分割する．図 8 に，帯領域と中央ライン，配置した母点の関係を示す．式(2)より，隣接する母点の間隔は $\sqrt{s}$ であるが，ボロノイ分割では隣接するボロノイ領域の境界はそれぞれの母点の垂直二等分線となるため，帯領域は長手方向に順次 $\sqrt{s}$ の間隔で分割される結果となる．元々の帯領域は $\sqrt{s}$ の幅を持っており，再分割された小領域は概ね一辺が $\sqrt{s}$ の四辺形になる．以上の考察より，再分割の結果，面積が概ね目標とした s と等しくなる小領域が帯領域内部で隙間なく連なって形成されると期待できる．

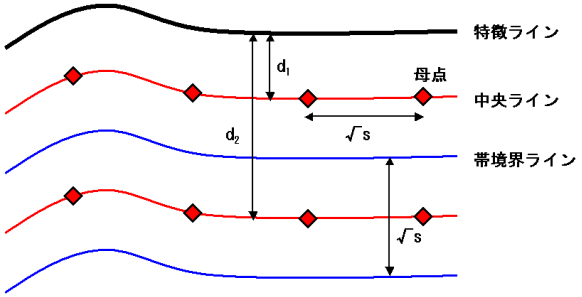

図 8　中央ラインと母点
Figure 8　Center lines and located points.

4.2.3 小領域の生成例

図 9 に，図 7 と同じ形状の一部について，Noda の手法と提案手法を用いて小領域を生成した例を示す．提案手法では，Noda の手法と同様に小領域が特徴ラインを境界としてこれに沿うように形成されていることが確認できる．また，タイルの目地に相当する空虚部が生じず，空間全域を小領域で充填できている．一方，一部の小領域では一辺が短く扁平な形状となっている．これは，中央ラインの長さが√s の整数倍ではないために母点を全て等間隔で配置できなかったことに起因する．

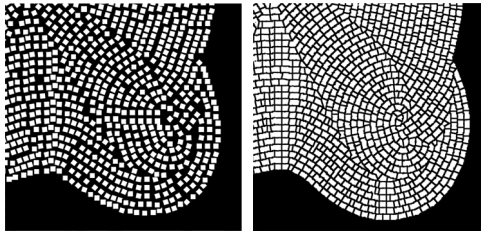

図 9　Noda の手法（左）と提案手法により生成された小領域（右）
Figure 9　Cells generated by Noda's method (left) and our method (right).

4.3　処理手順

改善した小領域分割を従来の異方性反射によるレリーフ表示に対して取り入れた，全体の処理手順を以下に示す．

- 対象とする 3D モデルを読み込む．
- 3D モデルに対して，法線マップと深度マップを取得する．
- 法線マップと深度マップから，特徴ラインを作成する．
- 特徴ラインからの距離マップを作成する．
- 距離マップに基づいて帯領域に分割する．
- 各帯領域の中央ライン上に，小領域生成のための母点を配置する．
- ボロノイ分割により，小領域を作成する．
- 各小領域の中心位置の法線ベクトルから，その小領域内部の溝角度を算出する．
- 個々の小領域内部を算出された角度の溝で充填し，版下画像を完成する．
- 得られた版下画像を用いて，エッチングや機械切削などにより型を作成し，これを用いて異方性反射媒体を作製する．

5.　実験結果

従来手法による正六角形の小領域と提案手法による適応的に分割した小領域の双方を用いて，実際に作製した異方性反射によるレリーフ表示媒体を図 10 に示す．モチーフとした花のデザインの媒体上でのサイズは概ね幅 145mm 高さ 95mm である．ここで視覚上の比較を適切に行うために，どちらも小領域の平均面積が 1mm^2 になるように調整し，小領域内部には 80 μ m 幅の平行線を 120 μ m の間隔で充填することで型の版下となる画像を作成した．この版下を用いて真鍮製の板にフォトレジストを形成

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan

し，エッチングにより 30 μ m の深度差で凹凸を実体化して型を作製した．最後に，作製した型を用いて箔押し加工にて板紙上にアルミニウム箔を圧着すると同時にエンボスを押すことで異方性反射媒体を作製した．

像全体の観察では，両手法においてモチーフである花の曲面の形状が異方性反射により正しく再現されていることが確認できる．また，拡大図からは，従来手法で違和感の目立っていた輪郭でのジャギーが提案手法では解消できていること，曲面内部でも同様に違和感が低減できていることが確認できる．後者は小領域の形状が不規則になったことで人工物らしさが低減したことも一因と考えられる．

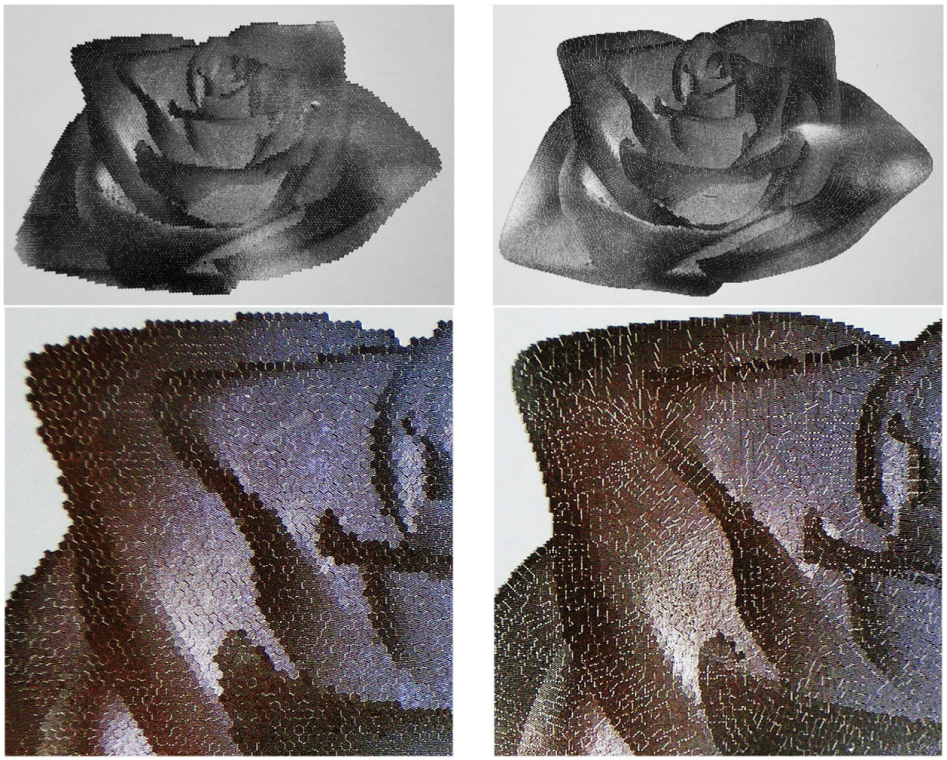

図 10　従来手法と提案手法による試作結果
Figure 10　Experimental results of previous method and our method.

6. まとめ

本研究では，異方性反射を利用してレリーフ状の立体形状を表示する手法について，平行な溝を付与する単位領域に現れる不連続なちらつきを低減するために，表示する 3 次元形状のエッジやリッジに沿った単位領域を生成する改善手法を提案した．この改善により生成した溝パターンを箔押し加工を用いて実体化することにより，原形状のエッジやリッジでの違和感が低減することを確認した．提案手法では小領域ごとに平行溝を充填しているため，反射光の不連続性を完全に解消することはできないが，不連続が曲率の小さな部分に限定されることで装飾用途としては実用上問題がない程度に改善できたと考えられる．

今後の課題として，図 9 で確認できた意図しない小さな面積の小領域が加工上の障害になることが予想され，改善が望まれる．中央ライン上の母点配置間隔は厳密に$\sqrt{s}$に一致させる必要はなく，$\sqrt{s}$ にできるだけ近い間隔で等間隔に配置することで解決できると期待できる．また，反射強度の不連続性を完全に解消するためには，文献[1]に記載されているように曲線で全領域を充填する手法を用いれば根本的に解決できるが，この手法では溝相互の間隔を一定に保つことが困難であり，この課題の解消が望まれる．

参考文献

1)　Yokoi, S. and Toriwaki, J.: Realistic Expression of Solid with Feeling of Materials, JARECT, Vol.18 (1988).
2)　Poulin, P. and Fournier, A.: A Model For Anisotropic Reflection, Computer Graphics, Vol.24, No.4, pp.273-282 (1990).
3)　河合直樹: 異方性反射によるレリーフ表示の基礎検討, 情報処理学会論文誌, Vol.51, No.3, pp.1118-1128 (2010).
4)　Noda, T. et al.: Mosaic Image Generation using 3D Models, Asiagraph 2009 Proceedings, Vol.3, No.1, pp.110-115 (2009).
5)　Turk, G. and Banks, D.: Image-Guided Streamline Placement, Proc. ACM SIGGRAPH ’96, pp.197-206 (1990).
6)　Mebarki, A., Alliez, P. and Devillers, O.: Farthest Point Seeding for Efficient Placement of Streamlines, Proc. IEEE Visualization 2005, pp.479-486 (2005).
7)　Hausner, A.: Simulating Decorative Mosaic, Proc. ACM SIGGRAPH 2001, pp.573-580 (2001).
8)　Elber, G. and Wolberg, G.: Rendering traditional mosaic, The Visual Computer, Vol.19, Issue 1, pp.67-78 (2003).

ⓒ2010 Information Processing Society of Japan