

均一色セル分割タイプの非写実的画像の生成

景 琳琳 井上 光平 浦浜 喜一

九州大学 大学院芸術工学研究院 視覚情報部門

E-mail: kei@gsd.design.kyushu-u.ac.jp, {k-inoue, urahama}@design.kyushu-u.ac.jp

概要：カラー写真をステンドグラス画像やカラースケッチ画像などの非写実的画像に変換する簡便で高速な手法として、画像を色が均一な領域に分割するタイプの処理法を提案する。本論文では、エッジベースの手法と領域ベースの手法とを提案する。エッジベースの手法では、入力画像から検出したエッジからの距離変換に基づいて画像をアポロニウス分割し、パンプマッピングによってステンドグラス風やキルティング風、タイル風などの画像を生成する。エッジからの距離変換を用いる同様な手法として、円板配置によるバブル画像の生成法も示す。領域ベースの手法では、入力画像を減色し、モードフィルタをかけて滑らかな境界の領域分割を得る方法を提案し、境界線や領域色を処理してステンドグラス画像やカラースケッチ画像を生成する。

キーワード：ステンドグラス画像，カラースケッチ画像，距離変換，アポロニウス分割，モードフィルタ

Generating Non-Photorealistic Images Decomposed into Uniform Color Cells

Linlin Jing, Kohei Inoue and Kiichi Urahama

Faculty of Design, Kyushu University

Abstract: Simple and fast methods for transforming color photographs into non-photorealistic images such as stained-glass and color-sketch images. We propose two types of methods decomposing images into homogeneous color regions. One type is an edge-based method and the other is a region-based approach. In the edge-based methods, an input image is tessellated into Apollonius cells by using the distance transform of extracted edges. This tessellation and its bump mapping produce stained-glass, quilting and tailing images. Similar method utilizing distance transform of edges is proposed for generating bubble images by arranging color disks on an input image. In the region-based approach, colors in an input image are quantized and smoothed with a mode filter for decomposing an input image into cells with smooth boundaries. Their boundary lines and region colors are then modified for generating stained glass and color sketch images.

Keywords: stained glass, color sketch, distance transform, Apollonius tessellation, mode filter

1 まえがき

本論文では、フラッシュ撮影写真や3Dデータなどを援用せずに1枚の画像だけから非写実的な画像を生成する非写実的画像処理技法を提案する。ここで提案する手法は、入力カラー画像を均一色のセルに分割するタイプである。そのようなタイプの非写実的画像処理技法としてはポロノイ分割に基づく手

法 [1] が有名であるが、ポロノイ分割ではセルの境界が区分的な直線になる。しかし、通常画像のエッジは曲線なので、セル境界が直線だと入力画像の再現性が限定される。実際、手作りのステンドグラスではハンダ線は曲線であることが多い。そこで本論文では、セル境界を円弧に拡張したアポロニウス分割と、任意の滑らかな境界線が得られる手法とを提案する。

均一色セル分割は最も単純な画像領域分割である．理想的な領域分割は空や家，人など意味に基づくものであるが，そのような意味的な領域分割を自動的に行うのは現状では困難である．そこで人手による補助入力を利用して知識に基づく分割を行う非写実的画像処理技法が最近多く提案されてきている [2, 3]．また大局的な画像特徴に基づくモザイク分割法 [4] も提案されている．しかし本論文ではあえて従来通りのボトムアップ的な自動的技法に限定する．ボトムアップ的自動領域分割は色やテクスチャなどの物理的な画像特徴量によるしかなく，意味的には不十分な分割しか行えないが，基礎的な要素技術として有用であると考え．そのようなステンドグラス風画像の自動生成法も提案されている [5] が，ここでは処理が単純な手法を提案する．

本論文では，エッジベースの手法と領域ベースの手法とを提案する．エッジベースの手法でも理想的には意味的なエッジが望ましく，領域分割と同様に難しい問題であるが，一般に，エッジ検出という色やテクスチャが不連続な境界を指すことが多く，領域分割よりも処理は単純である．しかし画像情報から抽出されるエッジは閉曲線ではなく，そのままでは領域分割には利用できない．ここではエッジに基づいてセル分割する手法を提案する．

物理的な領域分割では，意味的な分割に比べ，多数の細かいセルに分割されるが，ここでは次の3点を評価条件とする：1) セルの数が少ないほうがよい．2) セル分割画像と原画像との色の誤差は小さいほうがよい．3) セルの境界線は滑らかなほうがよい．

以上のように，本論文で提案する手法は，経験を要するユーザインタラクションを用いず，パラメータ設定程度の簡単なユーザ入力だけで自動的に画像を処理する方法であり，生成画像の画質はある程度犠牲にしても処理時間を短くすることを目標とする．

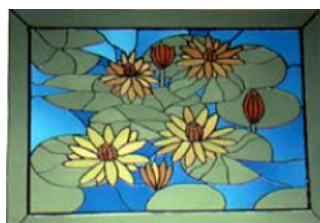


図 1: 単純なセル形状のステンドグラス



(a) 原画像



(b) 検出エッジ



(c) 主要エッジ

図 2: 主要エッジの抽出

2 エッジベースの手法

画像をボロノイ分割するタイルフィルタやステンドグラスフィルタがフォトタッチソフトに組み込まれているが，エッジが乱されるものが多く，画像の保存性は高くない．土橋らは原画像からの色の誤差を最小化する手法を提案した [6] が，通常のボロノイ分割であり，セル境界は直線である．この章では図 1 のステンドグラスの例のように境界線が円弧になるセル分割法を提案する．

2.1 エッジ抽出

画像の再現性にはエッジの保存が重要である．セル分割で画像を近似する場合には，セルの境界がエッジに重なるようにするのが望ましい．そこで，エッジからの距離変換を計算し，距離値を重みとする乗法的重み付きボロノイ図で画像を近似する手法が提案されている [7]．しかし原画像から抽出された全てのエッジに基づいてセル分割するので，不必要なセルが多数得られている．これは，既存のエッジ検出法では主要エッジの検出漏れを防いで，なお

かつ不要な微細エッジを検出しないようにするのは一般には困難であるためである。

そこで、主要エッジが漏れないように多めにエッジを抽出してから、短いエッジを削除することにする。具体的には、2値画像のラベリング処理によって、抽出されたエッジ画素の連結成分の1つずつに順番に番号を割り振り、各番号ごとに画素数を数えて、各連結成分の画素数を数え、それがしきい値(以下の実験では50とした)より少ない連結成分は削除する。しきい値はここでは50としたが、画像サイズ(対角辺長)に比例させたほうがよい。図2(a)の画像(サイズ655×419)から検出されたエッジを図2(b)に示す。これから短いエッジを削除すると同(c)となる。

2.2 アポロニウス分割

次に、前節の方法により抽出された主要エッジに基づいて画像を次の手順でセル分割する。

(1) 距離変換

まず最初に、エッジからの距離変換を求める。距離変換は、各画素から最も近いエッジ画素までの距離を画素値とするモノクロ画像である。この計算には高速ユークリッド距離変換アルゴリズム [8] を使う。

(2) 骨格の抽出

次に、距離変換の骨格画素を抽出する。骨格は、自分の4近傍に自分よりも距離値が大きい画素がない画素の集合である。

(3) 母点の選出

この骨格画素のなかからセルの母点をポアソンディスクサンプリングで選び出す。最初に任意の骨格画素を母点として確定し、残りの骨格画素から1つをランダムに選び、選んだ画素を中心としてその画素の距離値を半径とする円内に既確定の母点が無ければ、その画素を母点として確定し、既存母点が円内にあればその画素は棄却するという処理を、全ての骨格画素を調べ終わるまで繰り返す。

(4) セル分割

以上で得られた母点から重み付きボロノイ分割を求める。各母点の重みはその点の距離値とする。重み付きボロノイ分割は、 k 番目の母点の座標を p_k 、距離値を d_k とすると、座標 p の画素は $k_* =$

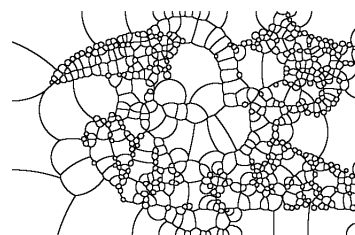
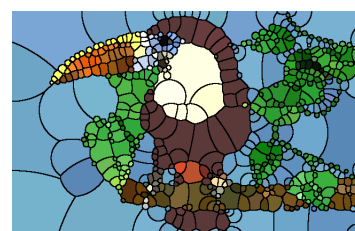
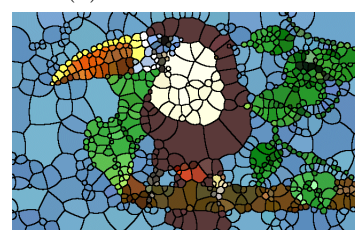


図 3: アポロニウス分割



(a) 微細エッジ除去後



(b) 微細エッジ除去前

図 4: 均一色セル分割

$\operatorname{argmin}_k \|p - p_k\| / d_k$ の母点 k_* に属すとし、各母点に属す画素の集合に画像を分割したものである。このようにすれば重みはエッジ画素までの距離であるから、セル境界はほぼエッジ上になる。この重み付きボロノイ分割にも高速アルゴリズムを用いる [9]。この乗法的重み付きボロノイ分割のセル境界は、隣接する2つの母点からの距離の比が一定のアポロニウスの円の1部である円弧になるので、アポロニウス分割と呼ぶ。図2(c)から得られたアポロニウス分割を図3に示す。

2.3 均一色セル分割

図3の各セルに各母点の原画像の画素の色を塗ると図4(a)のような均一色セル分割が得られる。なお、短いエッジを削除する前の図2(b)のエッジからは図4(b)のセル分割が得られる。セル数は図4(a)が614で、同(b)は790であり、図4(a)は画像の

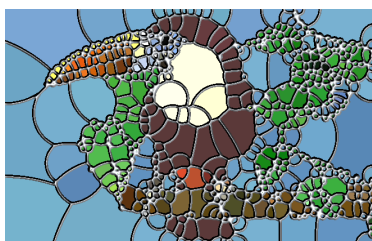


図 5: ステンドグラス風画像

近似度をほとんど落とさずにセル数を削減できている．図 4(a) でも実物のステンドグラスに比べると細かいセルが多すぎるが，ポロノイ分割より少ないセルで原画像の保存性の高い分割が得られている．

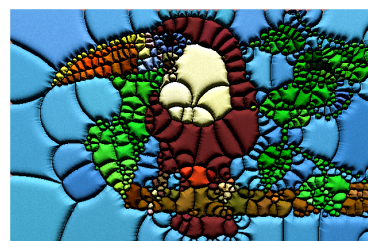
図 5 は，図 4(a) のセル境界線を 7 画素程度の幅に太くして凹凸を付け，ステンドグラス風にしたものである．また，図 4(a) にバンプマッピングを施すと図 6(a) のようになり，布あるいはビニールのキルティングを模した画像になる．バンプマップの高さは $1 - e^{-\alpha d}$ とした． α は正定数（ここでは $\alpha = 0.5$ とした）であり， d はその画素から最も近いセル境界までの距離である．この d の計算にも高速アルゴリズム [8] を用いる．また図 6(b) は母点配置の乱数が異なるセル分割画像に，境界線をぼかした画像を高さにした高低差が小さいバンプマッピングをかけたものであり，タイル風画像になっている．別の画像の処理例を図 7(サイズ 600×429) に示す．計算時間は図 6 が 4.1 秒，図 7 が 3.8 秒である．計算環境は，Pentium 4 CPU, 2.8GHz, 1GB RAM, OS は Windows XP, C 言語 (以下の実験も同じ) である．

2.4 円板配置

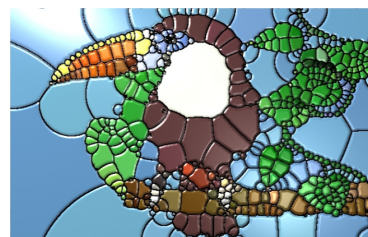
次に，原画像のエッジ保存性を考慮したセル分割法として，前節の重み付きポロノイ分割と同様に境界線が円弧に近いセル分割を簡単に得る手法として，入力画像をカラーの円板を敷き詰めた画像に変換する方法を考える．これは 1 種の円充填問題であり，円板を膨らませればセル分割が得られる．ここでは，次の手順でカラー円板の大きさと配置を求める．

(1) エッジ検出

2.1 節と同様にして，入力画像から主要エッジを検出する．図 8(a) のエッジを同 (b) に示す (エッジ検出のしきい値を図 2(b) のときの 1.2 から 1.1 に減



(a) キルティング風



(b) タイル風

図 6: バンプマッピング画像

らしてエッジを多めに検出している)．

(2) 距離変換

抽出した主要エッジからの距離変換を計算する．

(3) 円板配置

まず，エッジからの距離値が最大の画素を 1 番目の円板の中心とし，距離値を円板の半径にする．円板の色は中心の画素の色にする．2 番目以降では，既配置の円板に含まれる全ての画素をエッジ画素として距離変換を再計算し，距離値が最大の画素を中心に距離値を半径とする円板を配置するのを，円板の半径がしきい値（ここでは 2 画素としたが，画像サイズ(対角辺長)に比例させる)以下になるか，円板数がしきい値以上になるまで続ける．このようにすると重なりのない円板配置が得られる．図 8(a)(サイズ 240×179) の画像から得られた円板配置を同 (c) に示す．

2.4.1 円板サイズの均一化

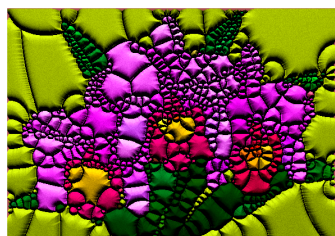
この手法では，図 8(c) のように少数の円板で原画像を表せているが，円板サイズが不揃いでバランスに欠ける．そこで円板の半径に上限（ここでは 10 画素とする）を設けて上記の円板配置を行うと，図 8(d)(この例では円板を透明な球に置き換えている) のようになり，円板がバランスよく充填された画像が得られる．図 8(d) は大きさの異なる透明ピース



(a) 原画像



(b) ステンドグラス風



(c) キルティング風

図 7: 別の画像例

を並べたビーズ画を模した画像になっている。

2.5 バブル画像

図 9(a) は図 8(d) の球を不透明にしたものであり、泡が並んだように見えるのでバブル画像と呼ぶことにする。この手法では、円板は重ならないように配置されるので、図 8(d) や図 9(a) のように隙間が生じるが、図 9(a) の球を膨らませると同 (b) のようになり、密着した泡で埋め尽くされたようなバブル画像になる。図 9(b) はある種のセル分割画像になっている。

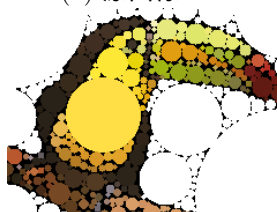
3 領域ベースの手法

2.2 節のアポロニウス分割はセル境界が円弧なので、境界が直線であるポロノイ分割よりも自由度が高くセル数を少なくできるが、それでも円弧の制約

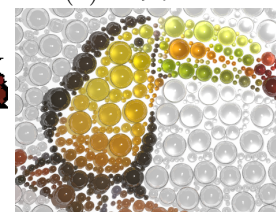


(a) 原画像

(b) エッジ



(c) カラー円板配置



(d) サイズ均一化円板充填配置

図 8: カラー円板配置

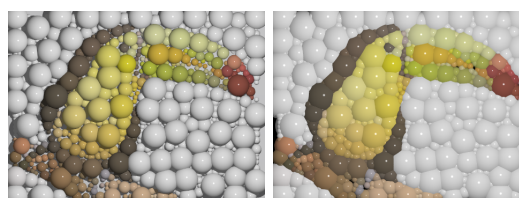
は厳しく、複雑な形状を表すのは難しい。そこで本章では、境界が任意の曲線になるような均一色領域分割法を考える。このようなセル分割は画像のセグメンテーションの 1 種であり、難しい問題である。文献 [2] ではユーザインタラクションを活用して領域分割を求め、図 10 のようなステンドグラス画像を求めているが、ここでは減色処理だけによる簡単で自動的な手法を提案する。

3.1 減色

まず最初に、次の手順で画像を減色する。

(1) メディアンカット

まず、画像をメディアンカット法で 30 色程度に減色する。メディアンカット法ではカラー分布の中央値(メディアン)で RGB 各チャンネルを 2 分割していくので、各色の画素数が同じになり、ほぼ同じ色の細かいセルができやすく、不要にセル数が多く



(a) 充填バブル画像

(b) 密着バブル画像

図 9: バブル画像

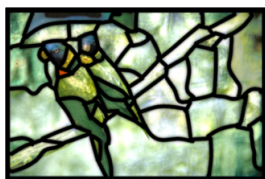


図 10: ステンドグラス風画像 ([2] より)



(a) 境界太線化 (b) ステンドグラス風画像



(a) 原画像 (b) 均一色領域分割

図 11: 減色モードフィルタによる均一色領域分割

なる [10] .

(2) 階層的クラスタリング

そこで次に、得られた色を階層的に統合して画像を更に減色する。メジアンカットで得られた色のなかで最も色が近い2色を統合して、それらの平均色にする。ここでは $C_1 = [R_1, G_1, B_1]$ と $C_2 = [R_2, G_2, B_2]$ の色差を L_1 距離 $|R_1 - R_2| + |G_1 - G_2| + |B_1 - B_2|$ で測り、 $(n_1 C_1 + n_2 C_2) / (n_1 + n_2)$ を2色の平均とする。 n_i は色が C_i である画素数である。最も近い2色の距離がしきい値 (ここでは50とした) 以上になった時点で統合を止める。

3.2 モードフィルタ

この減色によって画像は均一色領域に分割されるが、このままでは各領域 (セル) の境界は複雑に入り組んでおり、孤立した微細なセルも多数できる。そこでモードフィルタによって境界を滑らかにし、かつ孤立微細セルをなくす。モードフィルタでは、各画素の周囲のウィンドウ (ここでは 3×3 とする) のなかで最も多い色に中央の色を置き換えるという処理を全画素で並列に繰り返す。この反復更新は10回程度で収束する。

このモードフィルタで孤立微細セルはほとんどなくなるが、面積が30画素程度以上の孤立セルは残るので、2.1節のエッジラベリングによって周囲長

図 12: ステンドグラス風境界線処理

がしきい値 (このしきい値は画像サイズに比例させる) 以下のセルは削除する。削除したセルは、隣接するセルのなかで最も色が近いセルに統合する。それでも、しきい値以上の孤立セルは残るが、本論文では以上の処理にとどめる。この方法で図 11(a) の画像 (サイズ 642×482) を均一色領域分割した結果を同 (b) に示す。

3.3 セル境界線と領域色の処理

以上のように均一色領域に分割しただけの画像は、まだ実物のステンドグラスやカラースケッチのような視覚的印象が弱く、それらの模擬画像生成としての非写実的画像処理効果が不十分なので、次にセルの境界線とセル領域の色に処理を加える。

3.3.1 ステンドグラス風

ステンドグラス風画像生成では、まずセル境界線を太くする。図 11(b) の境界線をぼかしてから2値化することによって太くした結果を図 12(a) に示す。次に、ぼかした境界線を高さにしてバンプマッピングして、この太くした境界線に実物のハンダの盛り上がりのような陰影を付ける。またセル領域内では、原画像にノイズを加えてぼかし、ガラス様の光沢を付ける。図 12(a) にそれらの処理を施した結果を同図 (b) に示す。これはステンドグラスを模した画像であり、七宝焼にも類似の作品がみられる。別の画像例を図 13 (サイズはどちらも 600×450) に示す。計算時間は図 12 が 6.5 秒、図 13 が 5.7 秒である。実物のステンドグラスと比べたときの画質は文献 [2] よりも劣るが、ユーザインタラクションを用いない自動処理で、短い計算時間で類似の画像が得られている。



図 13: 別の画像例

3.3.2 カラースケッチ風

水彩によるカラースケッチでは、視覚効果を高めるために各領域の縁が白く塗り残されることが多い。文献 [3] ではスプライン関数を用いた複雑な処理とユーザインタラクションを援用して、図 14 のようなカラースケッチ風の画像を生成しているが、ここでは簡単に、セル境界線の周囲の画素を白くするだけにする。セルの境界線を膨張させて太くする。このとき、面積が広いセル領域のほうへより広く境界線を広げる。ここでは白線の幅を、画像全体に対する領域の比率 (領域の面積/画像サイズ) f に比例させて、 $r \times f$ とする。 r は比例係数である。このように広げた境界線部分を白くして、最初の境界線を黒く上描きする。また、カラースケッチではパステル調の色が塗られることが多いので、領域分割色の明度を上げて彩度を落とす。これらの処理を行った結果を図 15 に示す。比例係数 r は図 15 左の画像では $r = 40$ 、右の画像では $r = 75$ とした。 r が大きい図 15 右のほうが全体的に白線が幅広くなっている。手描きのカラースケッチでは塗り残しの余白が狭いところと広いところとのメリハリがあり、変化に富んでいるが、本手法で生成される余白は境界にほぼ平行で規則的過ぎる。その点で結果画像の画質



図 14: カラースケッチ風画像 ([3] より)

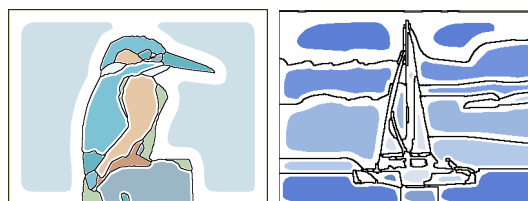


図 15: カラースケッチ風画像

は文献 [3] の手法よりも劣るが、格段に簡単な自動処理でカラースケッチ風の画像が得られている。計算時間は図 15 左が 7.8 秒、右が 7 秒である。

4 むすび

画像を均一色のセルに分割するタイプの自動的な非写実的画像処理法として、エッジベースと領域ベースの各手法を提案した。理想的な領域分割は物体認識に基づくものであり、本提案手法で得られる境界線は、明暗によるエッジなど物体の輪郭以外のエッジも含むが、処理は単純であり、いずれも数秒程度で済む。エッジベース手法では、テクスチャ特徴量も加えてエッジ抽出を改善するのが今後の課題である。領域ベースの手法でも同様に、色だけでなくテクスチャ特徴量も併用して領域分割を改善するのが今後の課題である。またスタンドグラス画像での孤立セルの処理法も今後の課題とする。

なお、本論文は NICOGRAPH2006 秋季大会で発表した論文 [11] に加筆したものである。論文査読者からの有益なご指摘に深謝する。

参考文献

- [1] G. Faustino and L. Figueiredo, “Simple adaptive mosaic effects”, Proc. SIBGRAPI, pp.315-322, 2005.
- [2] S. Brooks, “Image-based stained glass”, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., 12, 6, pp.1547-1558, 2006.
- [3] F. Wen, Q. Luan, L. Liang, Y. Xu and H. Shum, “Color sketch generation”, Proc. NPAR, pp.47-54, 2006.
- [4] 小島加寿代, 高橋成雄, 西田友是, “グラデーションを考慮に入れた四辺形ベース画像モザイク化”, Visual Computing グラフィクスと CAD 合同シンポジウム, pp.189-194, 2006.

- [5] V. Setlur and S. Wilkinson, “Automatic stained glass rendering”, Proc. CGI, pp.682-691, 2006.
- [6] Y. Dobashi, T. Haga, H. Johan and T. Nishita, “A method for creating mosaic images using Voronoi diagrams”, Proc. EUROGRAPHICS, pp.341-348, 2002.
- [7] 辻本陽子, 井上光平, 浦浜喜一, “乗法的重み付きポロノイ図に基づくステンドグラス風画像”, 信学論, J88-A, 1, pp.96-98, 2005.
- [8] 井上光平, 辻本陽子, 原健二, 浦浜喜一, “2 スキャンアルゴリズムによるユークリッド距離変換の高精度化”, 信学論, J88-D-II, 3, pp.657-660, 2005.
- [9] 井上光平, 原健二, 浦浜喜一, “重み付きポロノイ分割の2 スキャンアルゴリズム”, 映情誌, 60, 7, pp.1072-1076, 2006.
- [10] 井上光平, 浦浜喜一, “減色モードフィルタによる平滑境界セグメンテーション”, 信学論, J87-A, 5, pp.701-703, 2004.
- [11] 景琳琳, 井上光平, 浦浜喜一, “均一色セル分割タイプの非写実的画像の生成”, NICOGRAPH2006 秋季大会, pp.49-54, 2006.