

適応的非等方ボロノイ分割によるステンドグラス風画像の生成

Adaptive Anisotropic Voronoi Tessellation for Generating Stained Glass Images

王 濤 井上 光平 原 健二 浦浜 喜一
Tao Wang Kohei Inoue Kenji Hara Kiichi Urahama

九州大学大学院 芸術工学研究院
Faculty of Design, Kyushu University

あらまし セル分割を画像によって適応的に調節する非等方ボロノイ分割によるステンドグラス画像の生成法を提案する．入力画像を4分木分割し，区画の分散と中心点間の距離が閾値を下回ったら細分を止め，各区画の中心に点を打つ．これらの点を母点として画像を非等方ボロノイ分割する．最後に，微小なセルを除去し，孤立セルの境界線を最小全域木で連結させる．この適応的セル分割法によって入力画像の色変化に適合したステンドグラス画像が得られることを従来法との比較で示す．

1 まえがき

ボロノイ分割によるステンドグラス画像を生成するノンフォトリアリストックレンダリング (NPR) は，母点の配置と画像のセル分割の2段階からなる．母点の配置については，物体の輪郭を乱さないように，母点位置を最適化する反復法 [1] や骨格画素から母点を選ぶ手法 [2] などが提案されている．母点を配置した後，画像がボロノイセルに分割される．これらの手法 [1, 2] では，セル分割は等方的なボロノイ分割であるが，非等方ボロノイ分割にすれば輪郭の保存性が向上する [3, 4] ．

また，実際のステンドグラスでは図1の単純な例のように，セルの大きさは変化に富むが微細なセルはあまり使われず，ガラス片を接着する鉛線は互いに繋げられ，孤立したガラス片は稀である．これらは製作の手間や全体の強度を保つためと考えられる．

本稿では，このようなステンドグラス風画像を非等方ボロノイ分割 (AVT) で生成する NPR 法として，4分木分割で母点を配置する手法を提案する．従来の AVT [3, 4] では，セルの数は経験的に決められており，画像全体にほぼ一様に配置されるのでセル分割に変化が乏しい．本稿では，入力画像の各場所での色の変化に応じて，セルの面積が，色が平坦な所では大きく，変化が激しい所では小さくなるように4分木分割で求める．また孤立セルをなくすために，最小全域木を利用してセル境界を連結する．

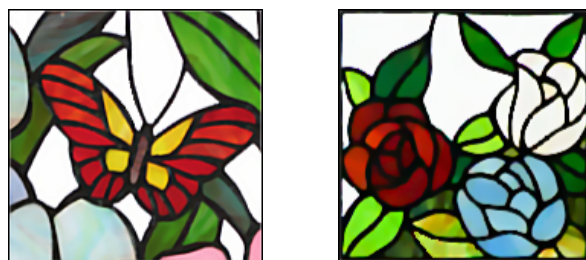


図 1: ステンドグラスの実例

2 非等方ボロノイ分割 (AVT)

提案法を述べる前に，基本となる非等方ボロノイ分割 (AVT) を概説する．入力カラー画像を少しぼかした画像の第 i 画素の (x, y) 座標を (x_i, y_i) とし，色の CIELAB 座標を $c_i = [l^*_i, a^*_i, b^*_i]^T$ とする．ぼかす理由は，色が不連続なエッジでの過度の非等方性を緩和するためである [3] ．また第 k 母点の位置と色を (x_k, y_k) と $c_k = [l^*_k, a^*_k, b^*_k]^T$ とすると，第 i 画素と第 k 母点のバイラテラル距離は

$$D_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + \alpha \|c_i - c_k\|^2} \quad (1)$$

である．ここで $\|c_i - c_k\|^2 = (l^*_i - l^*_k)^2 + (a^*_i - a^*_k)^2 + (b^*_i - b^*_k)^2$ である．AVT は，この距離による最近傍領域分割である．すなわち第 k セルは，第 k 母点に最も近い画素の集合 $\{i | D_{ik} \leq D_{ik'}, \forall k'\}$ である．

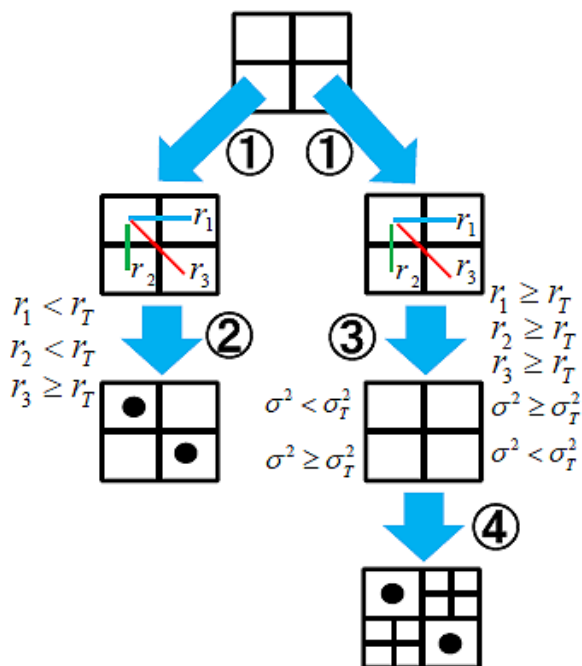


図 2: 4 分木分割

3 4 分木分割による母点配置

従来の AVT[3, 4] では、適当な数の母点を一様に配置するのでセルサイズが均等になるが、本稿では色分布で適応的にセルサイズが変わるように、4 分木分割で母点を求める。通常の 4 分木分割の分割停止条件は区画の分散の閾値判定であるが、本稿では区画の中心間の距離も加える。これは微小なセルが密集して生成されないようにするためである。本稿での 4 分木分割の手順は以下である。

- 1) 色の分散の閾値 σ_T^2 と中心点間距離の閾値 r_T を設定する。
- 2) 入力画像を縦 2 分割、横 2 分割して 4 個の区画に分け、各区画について次のステップ 3 へ (図 2 の矢印①)。
- 3) 各区画を更に 4 つに細分割して、左上の小区画と残りの 3 つの小区画の中心点間距離を求め、3 つの小区画のうち距離が閾値 r_T より小さい小区画を消して、その区画の処理を終了する (矢印②)。中心点距離が全て r_T 以上なら 4 つの各小区画について次のステップ 4 へ (矢印③)。
- 4) 各小区画の $l \times a \times b$ の分散 σ^2 を求め、 $\sigma^2 < \sigma_T^2$ なら、その小区画の処理を終了し、 $\sigma^2 \geq \sigma_T^2$ なら、その小区画についてステップ 3 に戻る (矢印④)。

以上が提案法の手順である。ステップ 3 での「左上の小区画」には特別な意味はない。4 個の区画のうちどれでもよい。あるいは、4 個の小区画の中で誤差最小の区画を選ぶようにすれば精度が向上するが、手続きが煩

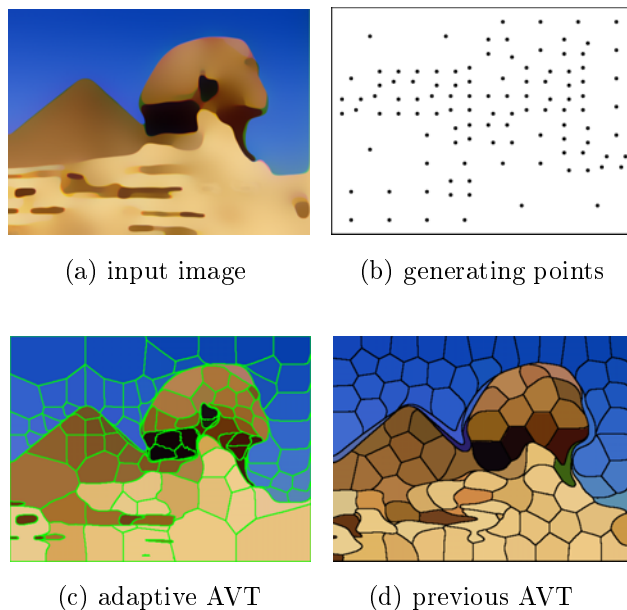


図 3: 適応的ボロノイ分割

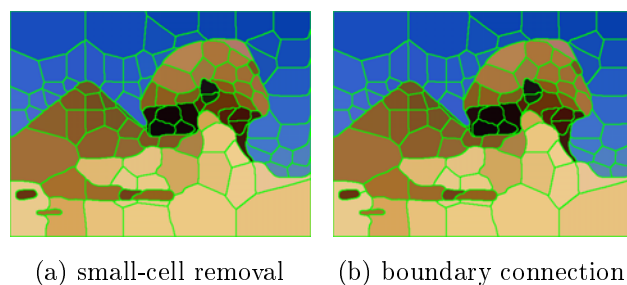


図 4: 微小セルの削除とセル境界の連結

雑になるので、ここでは単純に「左上の小区画」とした。

図 3(a) の画像 (563 × 422) で得られた母点と適応的 AVT を図 3(b) と (c) に示す。 $\sigma_T^2 = 220, r_T = 22, \alpha = 5$ とした。色が一樣な所では母点が疎らでセルも大きくなっている。図 3(d) は従来の AVT[3] であり、セルサイズが均一で変化に乏しい。セルの数は図 3(c) が 113 個で、(d) の 100 個よりも少し多いが、スフィンクスの頭部の形状の再現性は提案法のほうが高い。

4 微小セルの除去とセル境界の連結

上記の母点配置法では密集した微小セルが生成されないが、図 3(c) の左下部のように小さいセルが所々で生成される。そこで、セルの面積が閾値以下の母点を削除する。その結果、図 3(c) は図 4(a) のようになる。面積の閾値は 300 とした。また、左下端の暗い茶色の楕円のように、孤立したセルが生成されることがある。この例では細かくて分かり難いので、図 5 に別の例を示す。図 5(a) が入力画像 (500 × 500)、(b) が適応的 AVT であり、中央下の赤

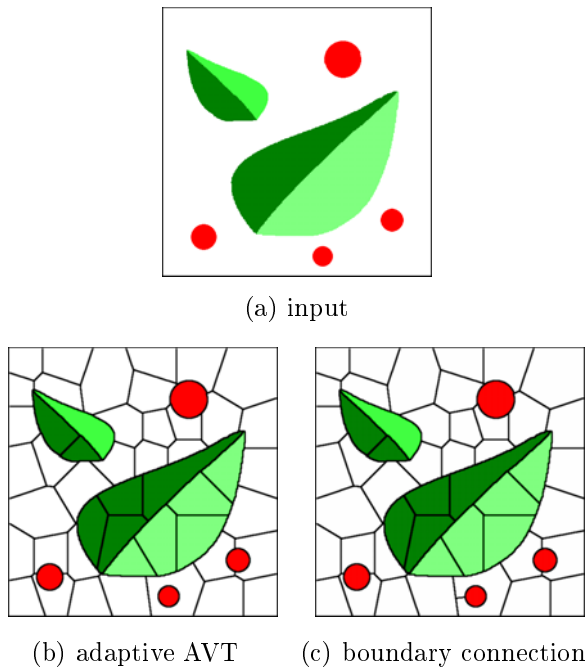


図 5: 孤立セル (下中央の赤丸) の連結の別の例

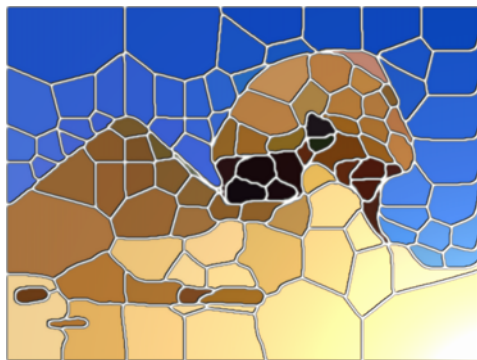
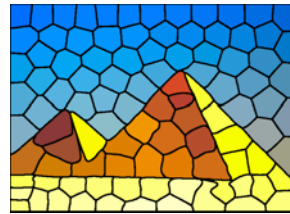


図 6: 図 4(b) のステンドグラス風画像

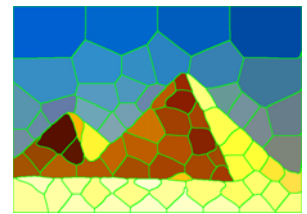
丸が (b) では孤立している。 $\sigma_T^2 = 600, r_T = 60, \alpha = 20$ とした。実際のステンドグラスではこのような孤立ガラス片は稀で、普通は他のガラス片と鉛線で繋がれる。このような孤立境界線を他の境界線に繋ぐために、本稿では最小全域木 (minimum spanning tree: MST) を用いる。すなわち、境界線上の全ての点を MST で繋ぐ。ここでは Prim 法で MST を求める。MST は全ての点を結ぶ総延長が最小の木なので孤立セルは近くのセル境界線と最短の線分で繋がれる。前例の図 4(a) の連結結果が図 4(b) で、図 5(b) の連結結果が図 5(c) である。図 4 では間隙が狭いので分かり難いが、それぞれで孤立セルが近くの境界線と繋がれている。図 4(b) に照明効果と鉛線の凹凸を付けたステンドグラス風画像を図 6 に示す。



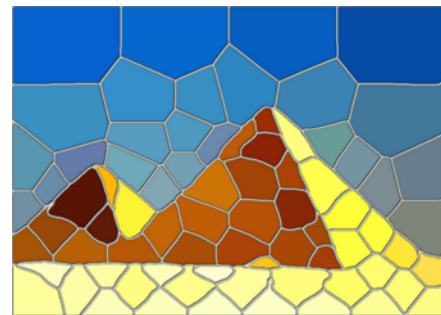
(a) input image



(b) previous AVT



(c) our method



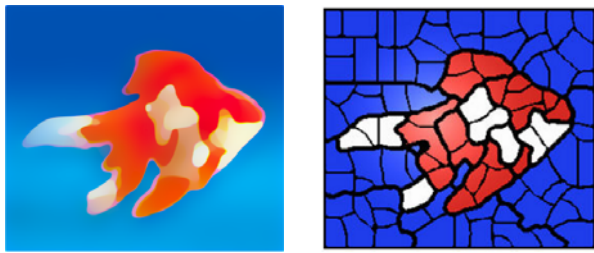
(d) stained glass image

図 7: 簡単な画像例

5 他の画像例での比較

図 3 の画像は少し複雑なので、提案法ではセルの数が少し多くなっているが、図 7(a) のような単純な画像 (720×516) でも以前の AVT ではセルの数は 100 個に統一して図 7(b) が得られている [4] が、提案法では図 7(c) のように 76 個で同程度の入力保存性が得られた。 $\sigma_T^2 = 180, r_T = 50, \alpha = 2$ 、面積の閾値=500 とした。図 7(d) は照明と凹凸を付けたステンドグラス風画像である。

このように、提案法では入力画像の色変化に応じて適度の数と大きさのセルが適応的に配置される。更に他の画像例について、従来の AVT [3, 4] に加えて、他の NPR 法とも比較する。図 8 では、(a) が入力画像 (386×342)、(b) が Seo らの結果 [5]、(c) が従来の AVT (セルは 100 個) [3]、(d) が提案法 ($\sigma_T^2 = 180, r_T = 22, \alpha = 5$ 、面積の閾値=400 でセルは 96 個) である。図 8(b) や (c) ではセルサイズが均等であるが、提案法 (d) では色が一樣な画像周辺でセルが大きくなっている。また、図 8(c) の下方では腹ビレと尾ビレが繋がってしまっているが、(d) では輪郭が保たれている。図 8(e) は照明と凹凸を付けたス

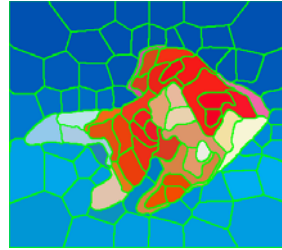


(a) input image

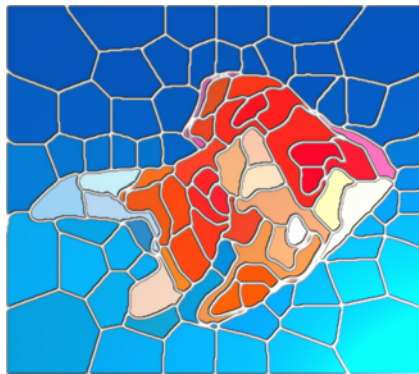
(b) Seo et al.[5]



(c) previous AVT



(d) our method



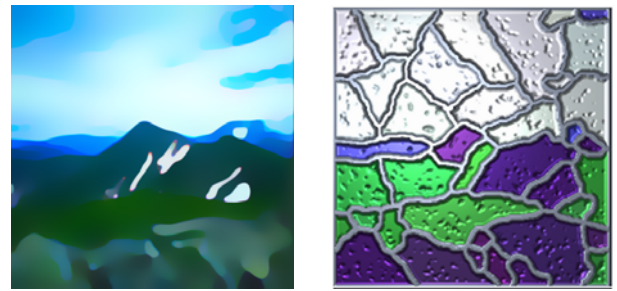
(e) stained glass image

図 8: 従来手法との比較例 1

テンドグラス風画像である。

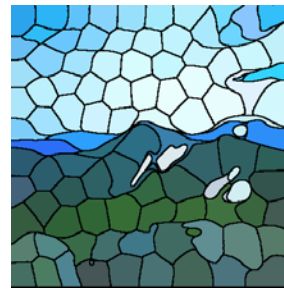
図 9 では、(a) が入力画像 (424 × 424)、(b) が Mould の結果 [6]、(c) が従来の AVT(セルは 100 個)[3]、(d) が提案法 ($\sigma_T^2 = 222, r_T = 20, \alpha = 10$, 面積の閾値=150 でセルは 118 個) である。図 9(b) はセルの数が少ないので公平に比較し難いが、セルサイズが色の分布に適応しておらず、(c) もセルサイズが均等である。本提案法 (d) はセルサイズが適応的に変化している。しかし、山の中央付近では分割され過ぎている。これは、この付近では色の変動しているためと思われる。山の稜線の再現性は (c) も (d) も同程度に良好である。図 9(e) は照明と凹凸を付けたステンドグラス風画像である。

図 10 では、(a) が入力画像 (400 × 270)、(b) は従来の AVT(セルは 100 個)[3]、(c) が提案法である。 $\sigma_T^2 = 140, r_T = 20, \alpha = 4$, 面積の閾値は 150 とした。従来の AVT(図 10(b)) では魚の輪郭が所々で変形しているが、

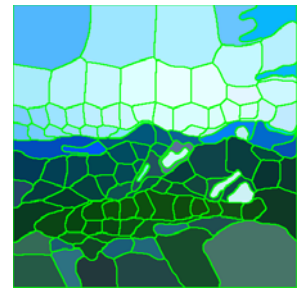


(a) input image

(b) Mould[6]



(c) previous AVT



(d) our method

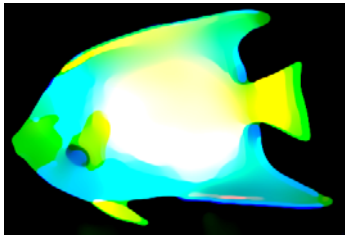


(e) stained glass image

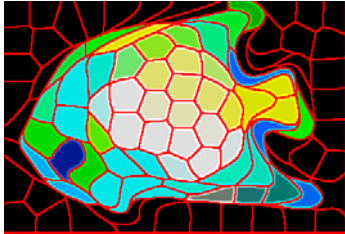
図 9: 従来法との比較例 2

提案法 (図 10(c)) では輪郭が良好に保たれている。しかし、細かいセルが所々にあり、ステンドグラスとしては改善の余地がある。図 10(d) は照明と凹凸を付けたステンドグラス風画像である。

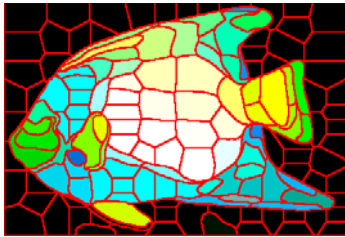
図 11 では、(a) が入力画像 (650 × 415)、(b) はアポロニウス (すなわち重み付き等方ポロノイ) 分割 [2]、(c) が提案法である。 $\sigma_T^2 = 160, r_T = 20, \alpha = 6$, 面積の閾値は 180 とした。図 11(b) は入力画像の保存性が高いが微小なセルが数多く見られる。これは、アポロニウス分割のセル境界は円弧 (アポロニウスの円) の一部なので、細長い領域では小さな丸が多数並ぶからである。これに対して図 11(c) は微小なセルはなく、入力画像の保存性も比較的高い。但し、歪みが大きいセルも見受けられ、ス



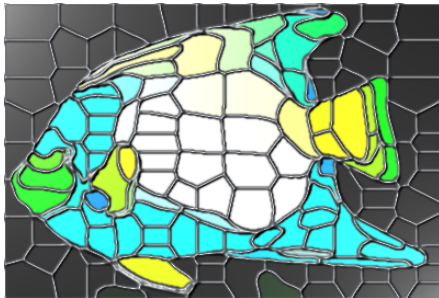
(a) blue fish



(b) previous AVT



(c) our method



(d) stained glass image

図 10: 従来法との比較例 3

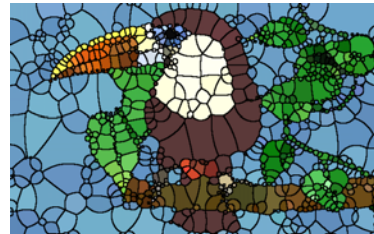
テンドグラスとしてはセル境界が複雑すぎる．図 11(d) は照明と凹凸を付けたステンドグラス風画像である．

図 12 では，(a) が入力画像 (473 × 479) で (b) は芳賀ら [1] の結果，(c) が提案法 ($\sigma_T^2 = 150, r_T = 5, \alpha = 0.8$ ，面積の閾値は 230) である．(b) ではセルサイズがほぼ均一であるが，(c) ではセルのサイズや形状が適応的に変化している．また中央のおしべやめしべの再現性も (c) のほうが高い．図 12(d) は照明と凹凸を付けたステンドグラス風画像である．

最後に図 13 では，(a) が入力画像 (500 × 500) で (b) が提案法の結果である． $\sigma_T^2 = 220, r_T = 30, \alpha = 8$ ，面積の閾値は 300 とした．この画像では従来法の報告例はない．図 13(c) は照明と凹凸を付けたステンドグラス風



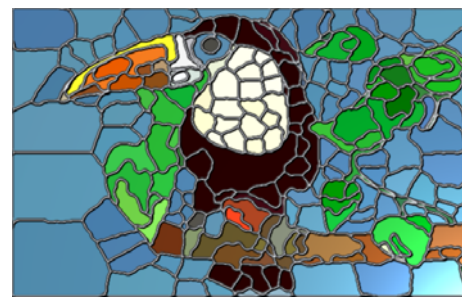
(a) toucan



(b) apollonius



(c) our method



(d) stained glass image

図 11: 従来法との比較例 4

画像である．この例でもセル境界が複雑に入り組んでおり，ステンドグラスとしては境界線を滑らかにする必要はあるが，輪郭の保存性は良好である．

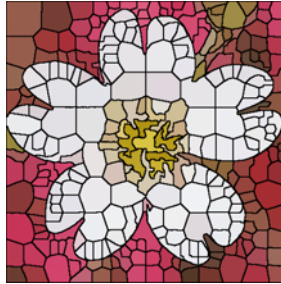
以上のように，画像によっては本提案法で必要最小限の数のセル分割が得られるとは必ずしも限らず，セルの形状が複雑すぎるが，入力画像の色変化に適応した可変サイズのセル分割が得られ，入力画像中の物体の輪郭が良好に保たれたステンドグラス風画像が得られた．セル境界が複雑に入り組むのは非等方性のためであり， α を小さくして非等方性を弱くするとセル境界は直線に近づくが，輪郭の保存性は低下する．色の均一性に依拠して場所によって α の値を変えると，セル形状の滑らかさと輪郭の保存性が両立できる可能性がある．



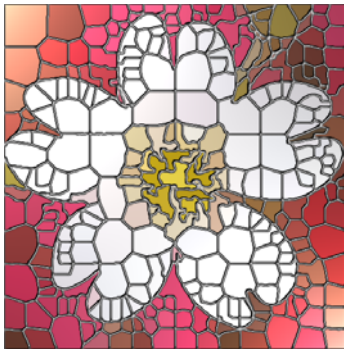
(a) flower



(b) Haga et al.[1]



(c) our method

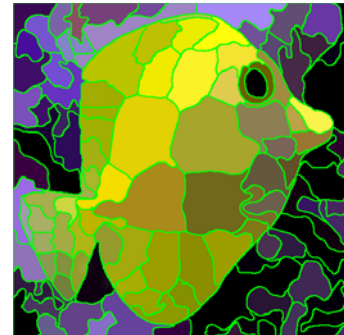


(d) stained glass image

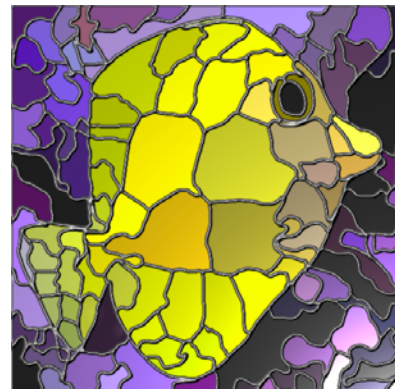
図 12: 従来法との比較例 5



(a) yellow fish



(b) our method



(c) stained glass image

図 13: その他の画像

6 むすび

入力画像を4分木分割して母点を配置する非等方ポロノイ分割法を提案し、セルの大きさと形が入力画像の色変化に適応したステンドグラス画像が得られることを示した。本提案法は分散と面積の閾値や非等方性の係数などのパラメータを含み、本稿では試行錯誤で適度な値を探索したが、それらを自動的に設定する方法が今後の課題である。特に、非等方性の係数 α を色の均一度に応じて適応的に変えれば、セル境界が滑らかで輪郭保存性も高いセル分割が得られる可能性があり、そのような拡張も今後の課題である。

参考文献

[1] 芳賀俊之, 西田友是, “ポロノイ図を用いた画像のステンドグラス化手法”, 情報学 G-CAD 研報, 104-4, pp.13-16 (2001)

[2] 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)

[3] 王富会, 浦浜喜一, “非等方ポロノイ分割によるステンドグラス画像”, 信学論, J94-A, 2, pp.149-152 (2011)

[4] 王富会, 王濤, 井上光平, 浦浜喜一, “非等方重心ポロノイ分割によるステンドグラス画像”, 映情学誌, 65, 7, pp.1000-1002 (2011)

[5] S. Seo, H. Lee, H. Nah and K. Yoon, “Stained glass rendering with smooth tile boundary”, Proc. ICCS, pp.162-165 (2007)

[6] D. Mould, “A stained glass image filter”, Proc. Rend. Tech., pp.20-25 (2003)