研究速報

重み付き非等方ボロノイ分割による線埋め込みステンドグラス画像

Line-Embedding Stained Glass Images by Weighted Anisotropic Voronoi Tessellation

学生会員 王 濤[†], 浦 浜 喜 一[†]Tao Wang[†] and Kiichi Urahama[†]

Abstract We present a non-photorealistic rendering method for generating stained glass images in which a line drawing is embedded. An input image is decomposed into cells by using a weighted anisotropic Voronoi tessellation on the basis of the distance transform of the input line drawing. Anisotropy and weighting are useful for preserving input lines embedded in stained glass images.

キーワード：ノンフォトリアリスティックレンダリング，ポアソンディスクサンプリング，ステンドグラス画像，ボロノイ分割

1. ま え が き

ステンドグラスはカラー写真を基にして作られることが多いが，図 1 のようにラフスケッチの線画から作られることもある．図 1(a),(b) はウェブページ <http://www.beastwithin.org/users/www.wolf/blog/2012>

/03/stained-glass-in-gimp-and-inkscape.html に示されている生成例（この例では背景に手が加えられている）であり，(c),(d) は <http://www.saltmanz.com/pictures/Artwork/Chris/Digital%20Art/Stained-Glass+Flowers++pencil+sketch.jpg.php> の例である．このように手描きの線画では線が閉じていない箇所も含まれる．これらの例では図 1(a),(c) の線画を埋め込んだステンドグラスを手作業で作り，それに彩色しているが，本稿では，ラフスケッチの線を単純化した図 2 のような線画を埋め込んだステンドグラス風画像を自動的に生成するノンフォトリアリスティックレンダリング (NPR) 法を提案する．埋め込む線画は，図 2 のように線の途切れも含むとする．本提案法では，このような線画をボロノイ分割に埋め込む．

最も単純な埋め込み法としては，図 3 に示す Di Blasi ら¹⁾ のモザイクタイル分割のように，線画に関係なく生成したボロノイ図に線画を直接重ね描きする方法が考えられるが，線画の線とボロノイ境界とが無関係なので，不自然なステンドグラス画像となる．

他の方法として，王らの非等方ボロノイ分割²⁾³⁾を応用

図 1 ラフスケッチ線画からのステンドグラス生成例
Examples of stained glass produced from rough sketch line drawings.

図 2 線画の例
Examples of line drawings.

2012 年 5 月 22 日受付，2012 年 8 月 6 日再受付，2012 年 8 月 10 日採録

[†] 九州大学 大学院芸術工学研究院 視覚情報部門

(〒 815-8540 福岡市南区塩原 4-9-1, TEL 092-553-4512)

[†] Faculty of Design, Kyushu University

(4-9-1, Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka-shi, 815-8540 Japan)

図3 Di Blasi ら¹⁾ のモザイクタイル分割
Mosaic tile tessellation by Di Blasi et al.¹⁾.

することが考えられる。しかし、この非等方ポロノイ分割は画素のカラー値に基づいており、線画に応用するためには、線画を一旦カラー画像に変換する必要がある。線画のすべての線が閉じていれば、そのような変換が可能であるが、一般には図1や図2のように線は閉じているとは限らないので、カラー画像には変換できず、王らの方法²⁾³⁾は本稿の目的には応用できない。

そこで本稿では、線画の距離変換値に基づく非等方分割ポロノイ法を用い、ポロノイセルの境界ができるだけ線画の線に一致するようにポロノイ分割に重みを付ける。また背景領域での無駄なセルを省くために、セルサイズを距離値に応じて適応的に変える。

ポロノイ図に線画を埋め込む類似手法として Mould の手法⁴⁾が提案されているが、後で示すように本稿の提案法は Mould の手法よりも入力線画の保存性が高い。

2. ポロノイ分割によるステンドグラス画像

本稿で提案するステンドグラス画像の生成手順は

- 1) ポアソンディスクサンプリング (PDS) によって点を配置する。
- 2) その点を母点として画像をポロノイ分割する。
の2段階からなる。このとき、入力線画の線がポロノイ領域の境界線にできるだけ一致する必要がある。PDSにおいて点が入力線からある程度離れるように、入力線画の距離変換を利用する。図4(a)の線画の距離変換を図4(b)に示す。距離変換は線からの最短距離を画素値とする濃淡画像である。PDSの手順は以下である。
- 1) ディスクの半径 r と距離の閾値 d_m を設定する。
- 2) すべての画素にランダムに番号 k を付ける。
- 3) $k = 1$ とし、step4へ。
- 4) 画素 k の距離変換値が d_m 以上なら step5へ。 d_m より小さければ step6へ。
- 5) 画素 k から半径 r 以内に既に点が打たれていれば step6

(a) input line image (b) distance transform

図4 入力線画の距離変換
Distance transform of input line drawing.

へ。打たれてなければ画素 k に点を打って step6へ。

6) k を1増やして step4へ。

図4(a)の線画について、このPDSで打った点を母点とするポロノイ分割を図5(a)に示す。 $r = 17, d_m = 15$ とした。このままでは図4(a)の線がわかり難いので、Mould⁴⁾と同様に、入力線画の線から距離 γ 以内の最近傍のセル境界線を太くしたのが図5(b)である。 $\gamma = 5$ とした。図3のDi Blasi ら¹⁾と違い、図5(b)では太い線もポロノイセルの境界線であり、線画の埋め込みとしては自然であるが、入力線画の線が途切れたり折れ曲がっており、文字が乱れている。

そこで、セル境界が入力の線にできるだけ一致するための改善として、ポロノイ分割を非等方にし、重みを付ける。

2.1 非等方ポロノイ分割

セルの形状を入力線に沿って歪めると、セル境界も入力線に沿うと期待される。そこで、上記のポロノイ分割での画素 i と母点 k の距離 $D_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2}$ をバイラテラル距離 $D_{bik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + \alpha(d_i - d_k)^2}$ に拡張する。ここで (x_i, y_i) と d_i は画素 i の座標と距離変換値、 (x_k, y_k) と d_k は母点 k の座標と距離変換値である。距離をこのように拡張するとポロノイ分割が非等方になる。王ら²⁾³⁾の方法では d_i や d_k はカラー値であるが、ここでは距離値である。

上記のPDSも非等方PDSに変える。すなわち、PDSでの画素と点間もバイラテラル距離で測る。この非等方PDSによる非等方ポロノイ分割を図6(a)に示す。 $\alpha = 0.4$ とした。図6(b)は入力線近傍のセル境界を太くしたものである。セル形状が入力線に沿うように歪み、線の折れ曲がりも少し改善されているが、図5(b)との差は僅かである。

2.2 重み付き等方ポロノイ分割

非等方化とは別の改善法は母点の重み付け⁵⁾である。図5のポロノイ分割ではすべての母点の重みは同じなので、隣接する母点の2等分線が境界になる。したがって、母点が入力線から等距離にないとセル境界が入力線からずれる。上

(a) isotropic VT (b) thickened lines

図5 等方ポロノイ分割
Isotropic Voronoi tessellation.

(a) anisotropic VT (b) thickened lines

図6 非等方ポロノイ分割
Anisotropic Voronoi tessellation.

記の PDS では、点は入力線から距離 d_m 以内には打たれないが、正確に d_m だけ離れるわけではない。そこで、母点が等距離でなくてもセル境界が入力線に一致するように、重みなし距離 D_{ik} を重み付き距離 $D_{wik} = D_{ik}/d_k$ に変える。こうすると母点からセル境界までの距離の比が母点の距離変換値の比になるので、入力線に一致すると期待される。この重み付き等方ボロノイ分割を図 7 に示す。図 5 よりも乱れが減少しているが、まだ所々で乱れが残っている。

2.3 重み付き非等方ボロノイ分割

以上のように、非等方化も重み付けも、それぞれ効果は認められるが不充分である。そこで、これらの非等方化と重み付けの両方を組合せて、重み付きバイラテラル距離 $D_{wbik} = D_{bik}/d_k$ を用いる。この重み付き非等方ボロノイ分割を図 8 に示す。乱れが減って入力線が比較的良好に保たれている。

2.4 適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割

この重み付き非等方ボロノイ分割では、セルのサイズは画像全体で均一なので、入力線の遠方でもサイズが細かく、セルの数が不必要に多い。そこで、入力線から離れるにつれてセルサイズが大きくなるように、PDS でのディスク半径 r を $r = r_m + pd_k$ に変える。この適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割を図 9 に示す。 $r_m = 15, p = 0.1$ とした。入力線の乱れも少なく、セルサイズも画像周辺で大きくなっており、無駄なセルが減っている。

なお、王ら²⁾³⁾ のカラー値による非等方ボロノイ分割では、色が一定の背景ではセルサイズを変えるのは難しいが、本提案法での距離変換値はすべての画素で勾配を持つので、画像全体でセルサイズを変えることができる。これもカラー

値でなく距離値を用いることの利点である。

図 10(b) は、図 10(a) の入力線画での適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割である。図 10(c) は Mould⁴⁾ の結果画像である。図 10(b) は図 10(c) よりも入力線画の保存性が高い。ちなみに、入力線近傍のセル境界を太くしないままの適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割をばかしてコントラスト強調したのが図 10(d) であり、太線化しなくても埋め込まれた線画がある程度判別できるのが分かる。

3. 他の入力画像例

図 2 の線画の適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割を図 11 に示す。また、他の線画の画像例での結果を図 12 に示す。左側が入力線画、右側が本提案法の結果である。入力線画が良好にセル境界に埋め込まれている。また、画像の周辺ではセルサイズが大きくなっており、無駄なセルが省かれている。しかし、入力線の近くでは、ステンドグラスとしてはセルサイズが細くなり過ぎている。これは、入力線画の保存性を高めるために、セルサイズの変化を大きくしたためである。

なお、図 11(a) に鉛線の凹凸と照明効果を付け加えたス

図 7 重み付き等方ボロノイ分割
Weighted isotropic Voronoi tessellation.

図 8 重み付き非等方ボロノイ分割
Weighted anisotropic Voronoi tessellation.

図 9 適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割
Adaptive cellsize weighted anisotropic Voronoi tessellation.

(a) input line drawings

(b) WAVT with thick lines

(c) Mould⁴⁾

(d) blurred WAVT

図 10 Mould⁴⁾ の結果との比較
Comparison with result by Mould⁴⁾.

(a) WAVT of lotus

(b) WAVT of hat

図 11 図 2 の線画の結果
Results for line drawings in Fig.2.

図 12 他の画像例
Other example images.

図 13 図 11(a) のステンドグラス風画像
Stained glass image of Fig.11(a).

ステンドグラス風画像を図 13 に示す。

4. む す び

線からの距離変換に基づいて、適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割に入力線画を埋め込んだステンドグラス風画像を生成する NPR 法を提案した。図 13 の結果を見ると、入力線画が変形しており、判別し難い。入力線画がわかりやすいように、図 2(a) を少し太くして図 13 に重ね描きしたのを図 14(a) に示す。また、ハスの花に色を付けた(輪郭線を補間して途切れを埋めてから彩色した)ものを図 14(b) に示す(ただし、輪郭の途切れが大きい場合にはこのような彩色は難しいと思われる)。このような後処理を付け加えれば入力線画がわかりやすくなるが、図 13 に見られる線の変形の主要原因は、入力線の近くに細かいセ

(a) Fig.13 with overlaid input lines

(b) Fig.13 with colored flower

図 14 図 2(a) の線を図 13 に上描きした結果と、花に彩色した結果

Result of overlaying lines in Fig.2(a) to Fig.13, and result of coloring flower in Fig.13.

ルが多数生成されることであり、このような細かいセルはステンドグラスには好ましくない。それらの細かいセルを併合すれば線の視認性が向上すると思われるので、そのような併合処理を付け加えるのが今後の課題である。

最後に、本研究は、科研費 24500208 の助成を受けた。

〔文 献〕

- 1) G. Di Blasi, G. Gallo and M. Petralia, "Puzzle image mosaic", Proc. IASTED/VIIP (2005)
- 2) 王富会, 浦浜喜一: "非等方ボ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)
- 3) 王富会, 王濤, 井上光平, 浦浜喜一: "非等方重心ボロノイ分割によるステンドグラス画像", 映像学誌, **65**, 7, pp.1000-1002 (2011)
- 4) D. Mould: "Image-guided fracture", Proc. Graph. Interface, pp.219-226 (2005)
- 5) D. Ashlock, B. Karthikeyan and K. Bryden: "Non-photorealistic rendering of images as evolutionary stained glass", Proc. CEC, pp.2087-2094 (2006)

おう 王 2010 年, 中国四川大学修士課程修了。同年, 九州大学大学院芸術工学府博士後期課程入学。画像情報処理に関する研究に従事。学生会員。

うらはま 浦浜 喜一 1980 年, 九州大学大学院工学研究科博士後期課程修了。同年, 同大学助手。1989 年, 九州工業大学助教授。現在, 九州大学大学院芸術工学研究院教授。パターン認識, 画像情報処理の研究に従事。