

バイラテラル距離に基づくノンフォトリアリスティックレンダリング

王, 濤

<https://doi.org/10.15017/1398383>

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済



KYUSHU UNIVERSITY

バイラテラル距離に基づくノンフォト
リアリスティックレンダリング

王 濤

バイラテラル距離に基づくノンフォト
リアリスティックレンダリング

Non-photorealistic Rendering
Based on Bilateral Distance

王 涛

Wang Tao

2013 年 9 月

目次

第1章 序論	1
1.1 本研究の背景.....	2
1.2 本論文の構成.....	5
第2章 画素値順PDSによる点描画と重み付きボロノイ分割による逆点描画	7
2.1 はじめに.....	8
2.2 点描 PDS.....	11
2.2.1 ランダム順 PDS.....	12
2.2.2 画素値順 PDS.....	15
2.3 ボロノイ分割による逆点描画.....	17
2.4 実験結果画像.....	23
2.5 まとめ.....	28
第3章 非等方PDSによる適応的な点形状の点描画	29
3.1 はじめに.....	30
3.2 非等方画素値順 PDS.....	33
3.3 非等方円による点描画.....	34
3.4 実験結果.....	36
3.5 まとめ.....	45

第4章 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	46
4.1 はじめに.....	47
4.2 4分木分割による母点配置.	51
4.3 非等方ボロノイ分割.....	54
4.4 微小セルの除去とセル境界の連結.....	57
4.5 実験結果.....	59
4.6 まとめ.....	70
第5章 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	71
5.1 はじめに.....	72
5.2 ボロノイ分割によるステンドグラス画像.....	76
5.2.1 非等方ボロノイ分割.....	79
5.2.2 重み付き等方ボロノイ分割.....	81
5.2.3 重み付き非等方ボロノイ分割.....	81
5.2.4 適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割.....	84
5.3 他の入力画像例.....	87
5.4 まとめ.....	93
第6章 結論	94
6.1 まとめ.....	95

6.2 今後の課題.....	96
謝辞	97
参考文献	98
付録	105
A CIELAB 色空間.....	105
B ユークリッド距離による等方ボロノイ図と 2 次形式距離による非等方ボロノイ図およびバイラテラル距離による非等方ボロノイ図の比較	107
C ユークリッド距離による等方点描画と 2 次形式距離による非等方点描画およびバイラテラル距離による非等方点描画の比較	115

第1章

序論

1.1 本研究の背景

コンピュータグラフィクス(以下 CG と略記)の分野において、光学など物理法則に則った光と影のリアリティある画像生成技術はフォトリアリストックレンダリングと呼ばれる。これらは、“写真で撮ったような” リアリティが高い画像を生成することを目指している。一方、CG におけるもう一つの重要なテーマとして、ノンフォトリアリストックレンダリング(以下 NPR と略記)は、写真のような現実感を求めた写実的な画像ではなく、油絵や貼り絵等アート風の画像のように、作者の意図を反映するような画像を生成する。特に実写的な画像から非写実的な画像に変換することが注目され、様々研究されるようになってきている[1][2]。

NPR 技術を利用して、フォトリアリストックレンダリングでは表現することが至難な、手描きの温かな質感や味わいといったものを表現することができる。Photoshop のような市販の画像編集ソフトウェアには、画像に対して各種の NPR の機能を備えたものが数多くみられる[3]。NPR 技術を大きく分類すると二次元的手法と三次元的手法がある。現在、二次元の分野において、点描画やステンドグラス風画像のような非写実的な画像に関する生成手法がいくつも発表されている[4][5]。

点描画とは、絵画などにおいて線ではなく点の集合や非常に短いタッチで表現する技法である。実写的な画像をもとにNPR技術で点描画を生成する場合、点を配置するとともに、点の色や形など性質を設定して点描画の特性を表す。従来手法として、視覚混合を考慮して限られた色紙の中から、入力画像の色に

近い色を複数選択し、並置されることで点描画を表現する手法[6]や補色対比を考慮して色をカラーライン量子化する手法[7]などが提案されている。モノクロ画像に対しては、色の情報を欠いているので点の分布や形で入力画像の明度変化やエッジなどを表現し、点描画を生成する。点を配置するには、ポアソンディスクサンプリング(以下PDSと略記)などの方法が使われているが、エッジや輪郭などに近い各部分の点をはっきり区分することが困難である。エッジを表すために、各点を楕円にして、それらの楕円の方向で入力画像のエッジを表現する手法がある[8]。しかし、それは点描ではない。手法[9]は、短い線分セグメントを利用して、点描画を描く。しかし、セグメントの長さは事前に固定する必要がある。

また、もう一つ重要な二次元NPR技術として、ステンドグラス風画像を生成する手法もよく提案されている。実際のステンドグラスは、ステンドとガラスの境界により、輪郭線などの特徴を表し、各ガラス領域はおおむね凸多角形と曲線で構成されている。現在ステンドグラス風画像を作るために一番多く使われている手法は、ボロノイ図を用いる方法である。ボロノイ分割によるNPR処理は、主に母点配置と画像セル分割の2段階に分けられる。PhotoshopやPaint Shop Proなどのフォトレタッチソフトには、写真をステンドグラス風画像に変換するフィルタが付いているが、単純な等方ボロノイ図を用いており、ボロノイ図の母点は入力画像とは無関係にランダムに配置されるので、入力写真の再現性が低く、セルの大きさが均一で表現能力が乏しい。芳賀ら[10]は、入力画像との誤差を小さくするように母点を配置し直す手法を提案している。しかし、等方ボロノイ図で分割するため、再現性を保つには多数のセルを必要とし、直線の折線で構成されるので、曲線や柔らかいエリアなどを表すことが困難である。辻本ら[11]は距離変換の骨格上に母点を配置している。しかし、入力画像か

らのエッジ抽出を要する手法においては、抽出されたエッジの状態によって大きく結果が左右される。

そこで、本論文では、画像の輪郭の保存性が更に向上するように母点を配置し、点間のバイラテラル距離を用いて点描画とステンドグラス風画像の生成を提案する。先ず点描画に対して、エッジの乱れが少ないPDSとして、暗い画素から順番にサンプリングしていく画素値順PDSを提案する。入力モノクロ画像の濃淡によって、エッジに近い部分をはっきり区別するように適応に点を配置する。そして、バイラテラル距離に基づき、エッジに沿って歪んだ橢円(非等方円)を描く手法を提案する。

また、ステンドグラス風画像の生成には、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分木分割で求めて、バイラテラル距離による非等方ボロノイ分割でセルを生成する。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。また、一般的な非等方ボロノイ分割方法が応用できない線画に対し、線画の距離変換値に基づく非等方分割ボロノイ法を用い、ボ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バイラテラル距離を重み付きに拡張し、セルサイズを距離値に応じて適応的に変える線埋め込みステンドグラス画像の生成手法を提案する。

1.2 本論文の構成

本論文は次の全 6 章から構成される。

第 1 章は序論であり、本論文の背景と動機、研究の方法または本論文の構成を述べる。

第 2 章では、モノクロ濃淡画像から点描画を生成するノンフォトリアリスティックレンダリング(NPR)法として、画素値順によるポアソンディスクサンプリング(PDS)を提案し、ランダム順サンプリングよりもエッジの保存性が高いことを示す。また、点描画を元の濃淡画像に戻す逆点描処理として、各点を母点として画像をボロノイ分割し、ボロノイセルの面積に比例した色を塗る方法を述べる。各点から最近点までの距離を重みとする重み付きボロノイ分割のほうが、重みなしのボロノイ分割よりも元画像の再現性が高いことを示す。

第 3 章では、第 2 章に述べた画素値順による PDS に基づき、エッジに沿う各点間のバイラテラル距離を考え、適応的に非等方円を描く手法を提案する。一般的の点描画と違って、元画像のエッジに近い点の形状は丸ではなく、エッジに従って適応的に変形できる。等方円よりも非等方円のほうが元画像の保存性が高いことを示す。

第 4 章では、ステンドグラス風画像について、物体の輪郭の保存性など入力画像の再現性およびガラス片の総数と形状を考え、入力画像を 4 分木分割して母点を求めることによって、セルサイズと形状を入力画像の色変化に適応させて、バイラテラル距離による非等方ボロノイ分割でステンドグラス画像を生成する。また実際のステンドグラスのように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ことについて述べる。

第5章では、無着色の線画に対し、入力された線画を距離変換し、距離値を含めたバイラテラル距離に基づく非等方PDSで点を配置し、それらを母点として画像を非等方ボロノイ分割する。ボロノイセル境界が入力線画に一致するよう、バイラテラル距離を重み付きに拡張する。そして、無駄なセルを省くためにPDSの半径を距離値に比例して大きくする手法を述べる。この適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割を濃淡画像やカラー画像にも応用する。

第6章は結論であり、本研究の総括および今後の課題について述べる。

第2章

画素値順 PDS による点描画と重み付き ボロノイ分割による逆点描画

2.1 はじめに

点描画(Stippling)とは、点の集合や非常に短いタッチで表現する絵画技法である[12]。一般的の点描画ではグレイスケールや限られた色数のカラーの小さな点のパターンで物体を表す[13][14]。図2.1は実際の点描画の例である。

グレイスケール画像に対しては、白い背景の上に黒い小さな点のパターンを並べることが多い。十分な距離からこれを見ると、点が非常に小さいため、人間の眼ではその点を識別できず、灰色であるかのように見え、黒い点と白い背景の面積の割合によってその部分の明るさが決まる。例えば、多数の黒い点や大きめの黒い点がある場合、暗い灰色に見え、黒い点が少ない場合や小さめの点の場合には明るい灰色に見える。それによって、物体の各部分をグレイスケールの明暗差で表すことができる。

カラー画像に関しては、限定された色数のインクを使うことが多い。よく使われるものは、レッド、グリーン、ブルーという色のセット(RGB)、またはシアン、マゼンタ、イエロー(黄色)、ブラック(黒)という色のセット(CMYK)である。色点描画では、これらの各色のインクについて点のパターンを生成する。そして、それらのパターンを重ね合わせることで、各色の割合に応じた色調が表現される。

また、ジョルジュ・スーラらは印象派による鮮やかな色の配列の視覚混合を追求し、点描主義という新印象派を確立した。純色の小斑点を画面に並置することで、それらが視覚混合によって、別の色彩のかげりを帶びつつ、より輝きを増すことを目的とする。たとえば、青と黄の並置された無数の小斑点からな

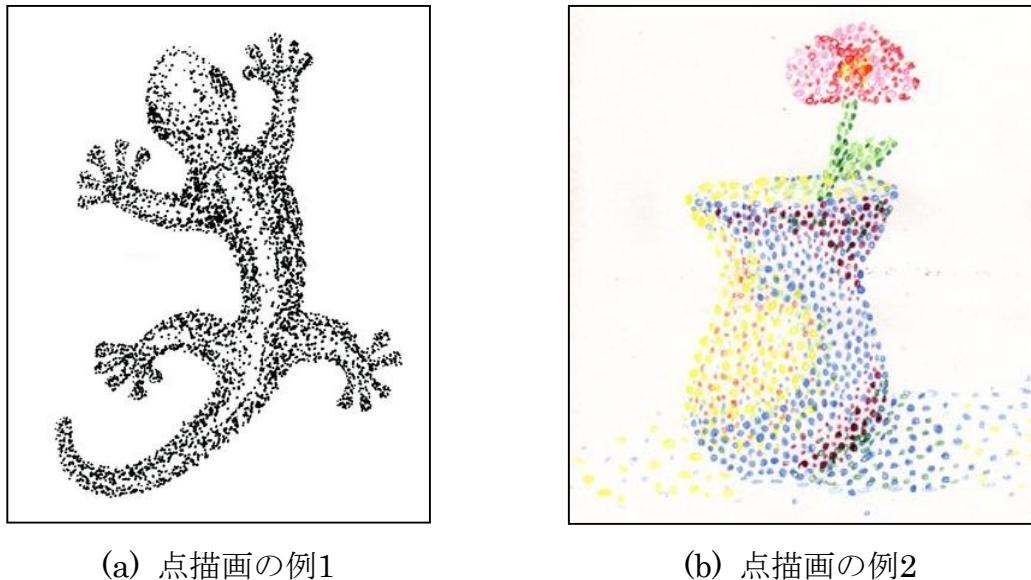
る集団は、適当な距離をとて見るとき、緑のかけりを帶びながら振動しているように見え、青と黄のどちらからも得られない輝きを得る[15].

本稿で考える点描画は、スーラなどの点描主義絵画ではなく、ハーフトーニングの1種の点描画であり、白い背景の上に同じサイズの黒い点を打って入力モノクロ画像の濃淡を表す。ハーフトーニングで多用されるのは誤差拡散ディザであるが、点描画では各点が隣の点と癒着しないように離されるので、ディザよりも点の密度が低い。従って一般に、点描画のコントラストは入力濃淡画像よりも低くなる。そのような点描画を生成するNPR法として、確率密度変換法[16]、Lloyd緩和法[17]、PDS法[18]などが使われる。

確率密度変換法とは、Secordらによる点描法を利用して、1枚の濃淡画像が与えられたとき、濃淡を確率分布とみて、一様分布からその確率分布への変換を求め、その変換に従って一様ランダムに打った点群を再配置する手法である。Lloyd緩和法というのは、点群を反復的に青色雑音(blue noise)に近い分布に収束させる方法である。与えられた二次元点群に対してボロノイ分割を計算して、ボロノイセルの重心に母点を移動させるという処理を繰り返す。PDS法は適度な距離間隔があるような点の空間分布に従って、点を配置して、点と点との間の距離が半径 r 以下にならないような点の分布を決定する。これらのなかではLloyd緩和法が点配置の一様性が最も高く、視覚的印象もよいが、青色雑音性やコントラストはPDSよりも低く、反復を要するので計算量も多い。また確率密度変換法も反復計算を要し、計算量が多い。PDSは計算も単純で青色雑音性も高いのでCGでのサンプリングによく使われるが、点描画ではエッジが乱れる問題がある。そこで本稿では、エッジの乱れが少ないPDSとして、暗い画素から順番にサンプリングしていく画素値順PDSを提案する。

また、例えば点描画の画像サイズを拡大縮小したい場合には、点描画は2値画

像なので濃淡画像よりも処理が難しい。縮小すると点どうしが癒着するので、間引く必要があるが間引き方が問題となる。反対に拡大すると、点が疎らになってしまうので点を増やす必要があるが、間隔を保って点を追加するのも難しい。そこで、点描画に拡大縮小などの画像処理を施す一つの手段は、点描画を一旦元の連続階調の濃淡画像に戻してから、それらの画像処理を適用し、再び点描画に変換する方法である。そのためには、点描画を濃淡画像に戻す処理、すなわちNPRの逆変換が必要になる。そのような逆NPR変換の簡単な一手法は、点描画の各点を母点とするボロノイ分割を求め、各ボロノイセルに面積に比例した色を塗る方法である。そのとき、等方的なボロノイ分割だとエッジが乱れるので、ボロノイ分割を非等方にする方法が提案されている[18]。しかし、その方法も等方ボロノイ分割を非等方に修正するものなので、最初の等方ボロノイ分割で生じるエッジの偏移が残る。そこで本稿では、等方ボロノイ分割において、各点から最も近い点までの距離を重みとする重み付きボロノイ分割で色を塗る方法を提案する。このような逆点描画処理は、画像の拡大・縮小への利用のみならず、点描画の濃淡再現性やエッジ保存性などの評価にも有用である。以上のように本稿で提案するのは、画素値順PDSと、重み付きボロノイ分割による逆点描画変換の2つである。



(a) 点描画の例1

(b) 点描画の例2

図2.1 点描画の例

Fig.2.1 Examples of stippling image.

2.2 点描 PDS

点描PDSとは、適度な距離間隔があるような点の空間分布に従って、点を配置する手法である。CGでよく使われるのは一定の間隔で点を疎らに打つ青色雜音サンプリングである。点同士が近づきすぎないように、ランダムに点を打つてみて、半径 r 内に他の点があれば、点を却下して、無ければ点を打つ。そのPDSの手順は以下である。画像のサイズ(総画素数)を n とする。

PDSの手順：

1. 円板(ディスク)の半径 r を設定する.
2. 全ての画素にランダム順に番号 $k (= 1, 2, 3 \dots, n)$ を付ける.
3. $k = 1$ の画素に点を打つ.
4. k を1増やす. $k = n$ なら終了. $k < n$ ならステップ5へ.
5. 番号が k の画素 (i, j) を中心として半径 r の円内に, まだ点が打たれてなければ, その画素に点を打ってステップ4へ. 既に点が打たれていれば点を打たずにステップ4へ.

本稿ではまず, この等間隔PDSの手順を濃淡画像の点描画に拡張して, 不等間隔なPDSとし, 画素をスキャンする順番として, 以下のように, ランダム順PDSと画素値順PDSを考える.

2.2.1 ランダム順 PDS

濃淡モノクロ画像を点描画に変換するランダム順PDSの手順は以下の通りである.
画像のサイズ(総画素数)を n とする.

1. 各画素 i での半径 r_i を設定する.
2. 全ての画素にランダム順に番号 $k (= 1, 2, 3 \dots, n)$ を付ける.

3. $k = 1$ の画素に点を打つ.
4. k を1増やす. $k = n$ なら終了. $k < n$ ならステップ5へ.
5. 番号が k の画素 i を中心として半径 r_i の円内に, まだ点が打たれてなければ, その画素に点を打ってステップ4へ. 既に点が打たれていれば点を打たず にステップ4へ.

エッジが分かりやすい図 2.2(a)の入力画像から作った点描画を図 2.2(b)に示す. 半径 r_i は, 入力画像の画素値を d_i とすると $r_i = a + b * d_i / 255$ とした. 図 1.2(b)は $a = 3, b = 15$ での結果である. 図 1.2(b)では顔の輪郭が所々で乱れている. これは, 図 2.2(b)に図 1.2(a)のエッジを重ね描きした図 2.2(c) (左下部の拡大を図 2.2(d)に示す)から分かるように, エッジのすぐ外にも点が打たれているので, それらの点が輪郭の内側か外側なのかが不明瞭なためである. このように, ランダム順に点を打つと, 顔の外側に先に点が打たれて, その後で内側に点が打たれると, 顔の外の点での半径以内にも, 内側の点が打たれ, 外側の点が内側に属すように見えてしまい, 輪郭の形状が乱れる.

そこで, サンプリングをランダム順でなく, 半径が小さい暗い画素から順番にサンプリングするように, 上記の手順を以下のように変える.

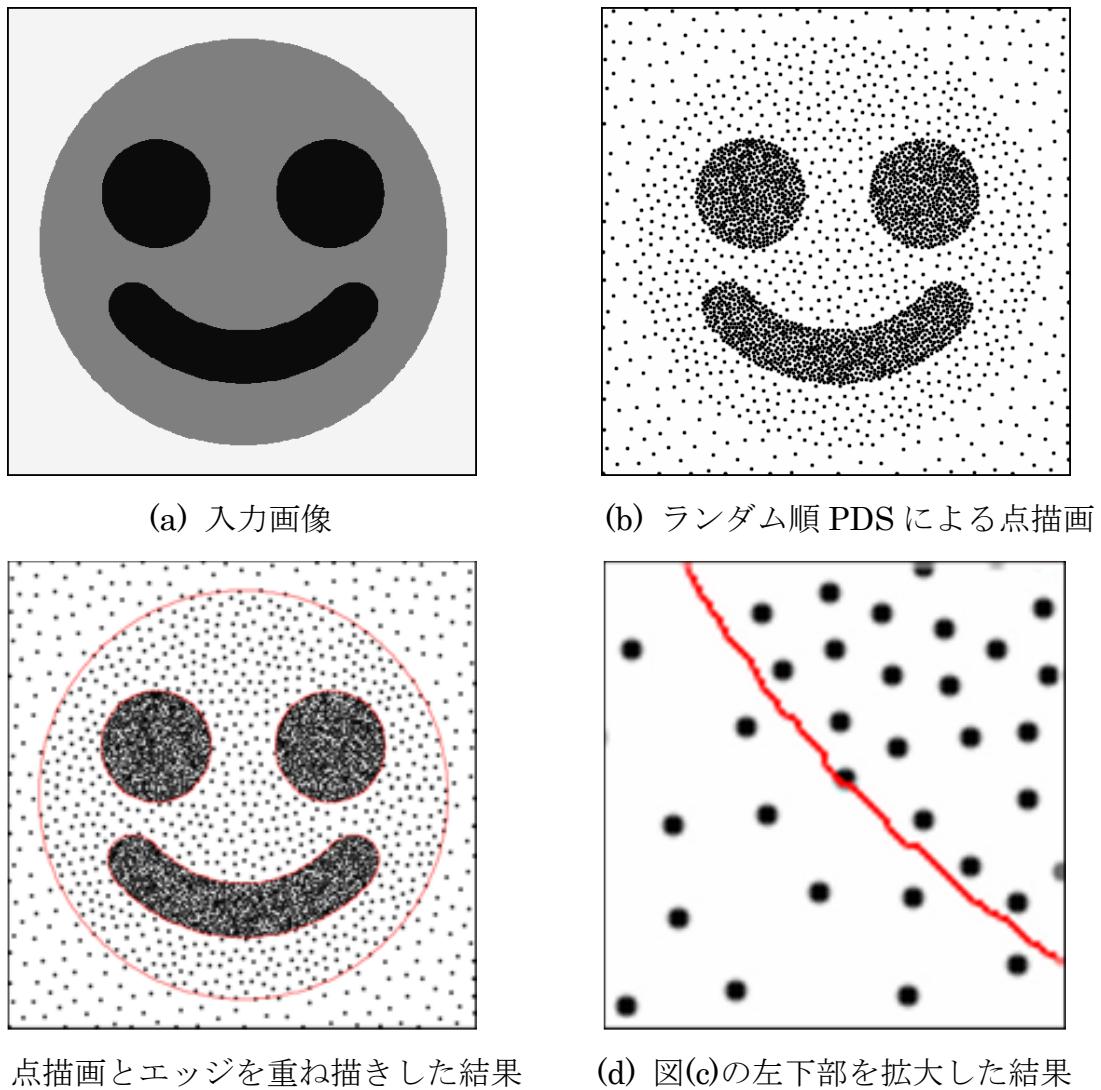


図2.2 ランダム順PDSによる点描画

Fig.2.2 Stippling image by random-order PDS.

2.2.2 画素値順 PDS

1. 各画素 i での半径 r_i を設定する.
2. 各画素の値 d_i に値が0以上1以下の一様乱数 m_i を加えて $f_i = m_i + d_i$ とする.
3. f_i が小さい順番に, 全ての画素に番号 $k (= 1, 2, 3 \dots, n)$ を付ける.
4. $k = 1$ の画素に点を打つ.
5. k を1増やす. $k = n$ なら終了. $k < n$ ならステップ6へ.
6. 番号が k の画素 i を中心として半径 r_i の円内に, まだ点が打たれてなければ, その画素に点を打ってステップ5へ. 既に点が打たれていれば点を打たず にステップ5へ.

この画素値順PDSの結果を図2.3(b)に示す. 図2.3(b)では, 図2.2(b)のようなエッジのすぐ外に打たれた点がなく, エッジが明瞭である. 図2.3(d)は2.2(d)と同じ部位の拡大図である. 図2.3(d)から見ると, エッジのすぐ外には点が打たれていないから, 簡単にエッジ内の点とエッジ外の点を区別することができる.

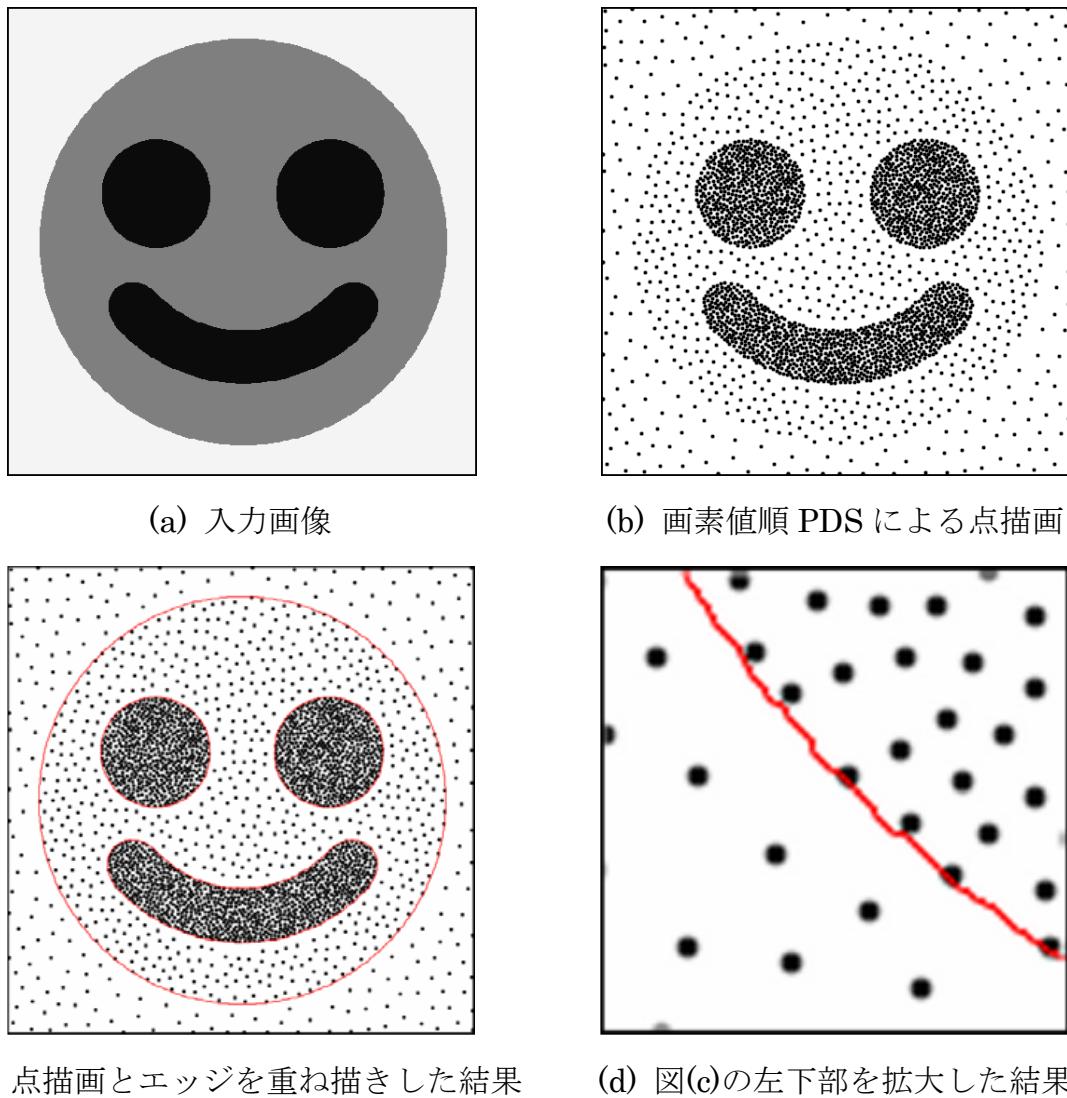


図2.3 画素値順PDSによる点描画

Fig.2.3 Stippling image by grayscale-order PDS.

2.3 ボロノイ分割による逆点描画

以上のように提案法である画素値順PDSは従来のランダム順PDSよりもエッジの乱れが少ないが、点描画は離れて見たときに視覚的なぼけによって濃淡変化が知覚されるのを利用した描画法であるから、濃淡画像に戻した比較もしてみる。点描画を濃淡画像に戻す逆点描処理として、ボロノイ分割による手法[19]を用いる。

ボロノイ分割による逆点描では、点描画の各点を母点とするボロノイ分割を求め、ボロノイセルの面積に比例する階調値を各セルに塗る。胡ら[19]は階調値を $g = c + d * s$ (s はセルの面積)としているが、 c と d の値を決めるのが難しく、また階調値 g が255よりも大きくなってしまう場合がある。そこで本稿では

$$g = 255 * (s - s_{min}) / (s_{max} - s_{min}) \quad (2.1)$$

とする。ここで s_{min} と s_{max} は面積 s の最小値と最大値である。このようにすれば設定を要するパラメータもなく、 g は[0,255]の範囲に収まる。

画素値順のPDSによる図2.3(b)の逆点描結果を図1.4に示す。セルの面積による濃淡のばらつきはあるが、図2.3(a)がほぼ復元されている。しかし、画像の四辺で暗いセルができている。これは、図2.3(b)では画像の四辺近くにも点が打たれているが、それらを母点とするボロノイセルは画像の四辺で切れるので、セルが小さくなり、暗くなることによる。すなわち、点描画としては図2.3(b)でよ

いのであるが、逆点描処理まで考慮すると図2.3(b)は少し変える必要がある。

そのために、上記の画素値順PDSの手順のステップ5を5'に変える。

ステップ5' 番号がkの画素(i,j)を中心として半径 r_{ij} の円内に、まだ点が打たれておらず、かつ半径 $r_{ij}/2$ 以内に画像の縁画素がなければ、その画素に点を打つてステップ4へ。円内に既に点が打たれているか、または半径 $r_{ij}/2$ 以内に画像の縁画素があれば、点を打たずにステップ4へ。

こうすれば、画像の四辺近くには点が打たれなくなる。ステップ5をこのように変えた手順での点描画を図2.5(a)に、その逆点描結果を図2.5(b)に示す。図2.4での画像四辺での暗いセルが図2.5(b)ではなくなっている。

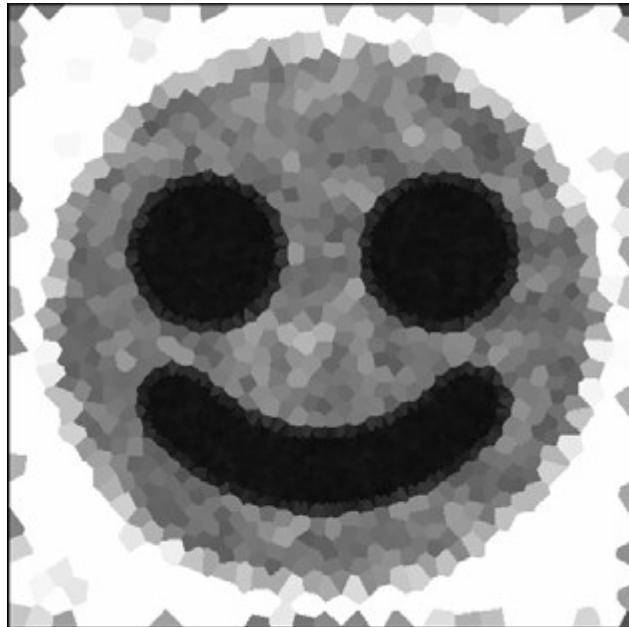


図2.4 図1.3(b)の逆点描結果

Fig.2.4 Inverse stippling image of Fig.2.3(b).

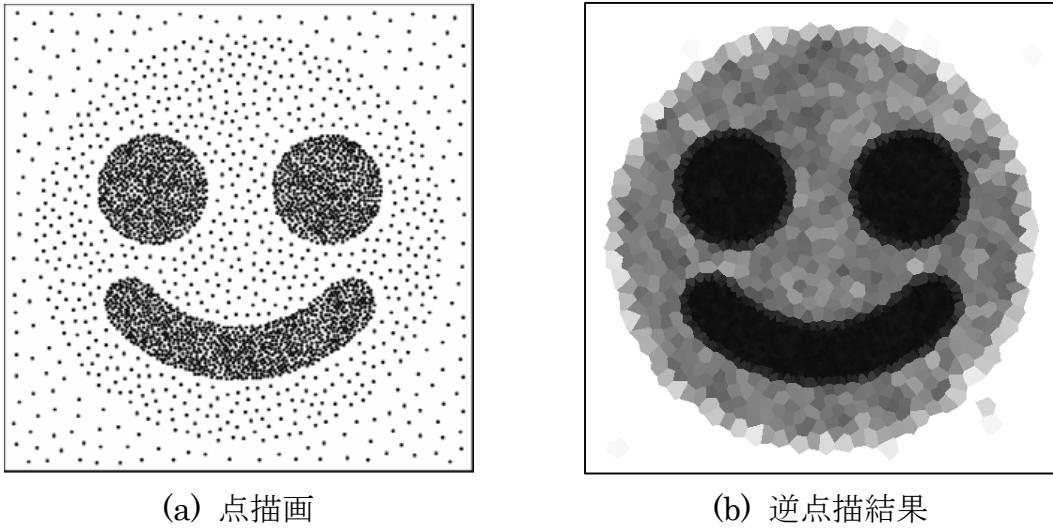


図2.5 画像の四辺近くに点を打たない点描画

Fig.2.5 Inverse stippling image with no points near the sides.

図2.5(a)の点描画の逆点描結果を図2.5(b)に示す。図2.5(b)にエッジを上書きした結果を図2.6に示す。眼や口および顔の領域が周囲に少しほみ出している。これは、図2.5(a)において、エッジの外側での点間距離は内側より広いので、ボロノイ分割では母点 (x, y) と画素 (i, j) との距離は $\sqrt{(x - i)^2 + (y - j)^2}$ であるが、ボロノイセルの境界である母点間の2等分線が外側にずれるためである。胡らばは、このボロノイ分割に続けて非等方ボロノイ分割しているが、このようなエッジの偏移は残ったままである[19]。

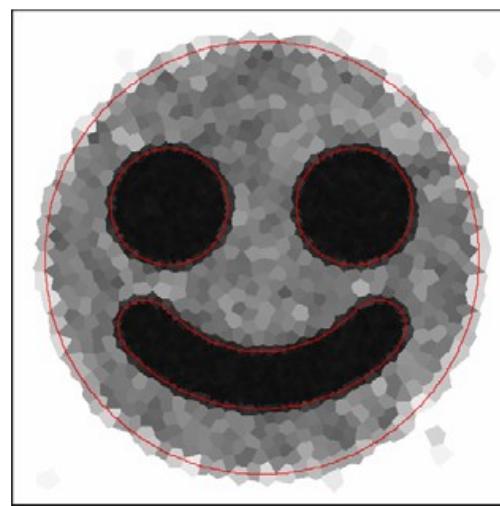


図2.6 点描画2.5(b)とエッジを重ね描きした結果

Fig.2.6 The result of stippling Fig.2.5(b) with edge line.

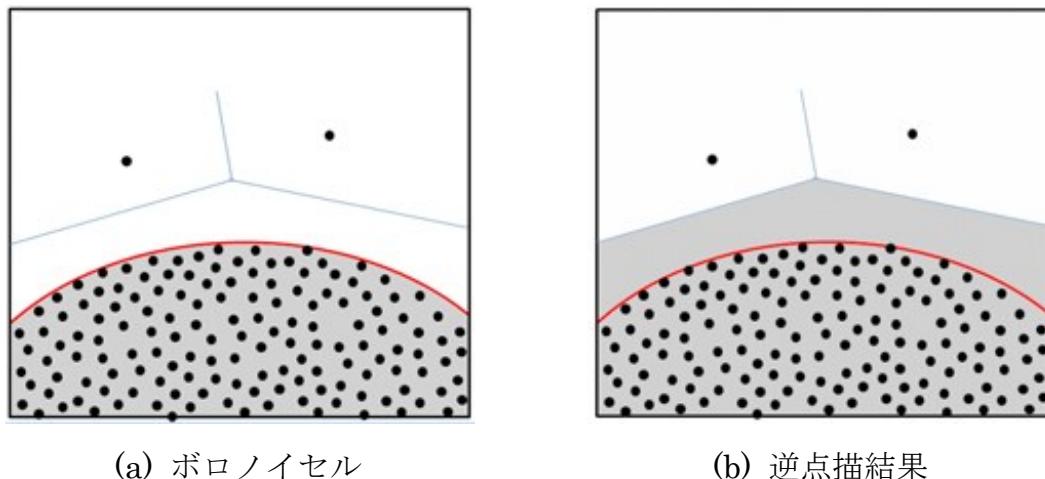
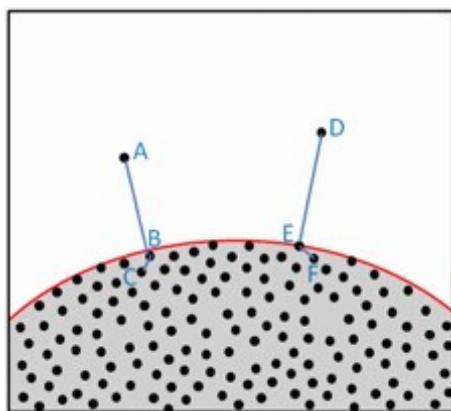


図2.7 エッジの偏移

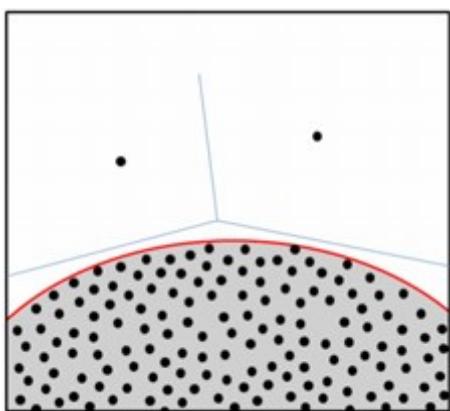
Fig.2.7 Offset of the edge.

そこで本稿では、ボロノイ分割を重み付きに変える。上記のボロノイ分割では母点 (x, y) と画素 (i, j) との距離は $\sqrt{(x - i)^2 + (y - j)^2}$ であるが、これを

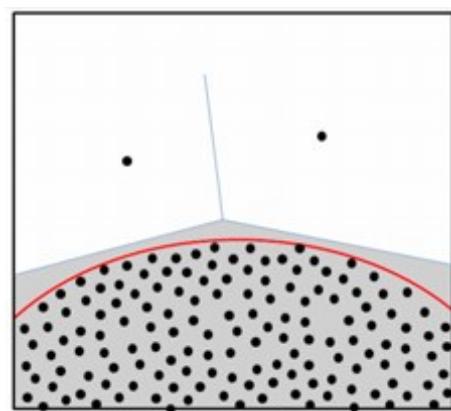
$\sqrt{(x - i)^2 + (y - j)^2}/D$ に変える。ここで D は、点描画の各点について、自分と最も近い点までの距離である。例えば、図2.8(a)の点Aに最も近いのはBであるが、そのBに最も近いのはCである。よってセル境界は線分ABをAB:BCで内分する垂線となり、同様に点Dに最も近いのはEであるが、そのEに最も近いのはFであるので、セル境界は図2.8(b)のようになり、セルに色を塗ると図2.8(c)となつて、図2.7(b)よりもエッジの偏移が小さくなる。



(a) 最近接点



(b) ボロノイセル



(c) 逆点描結果

図2.8 重み付きボロノイ分割

Fig.2.8 Weighted Voronoi tessellation.

図2.5(a)の重み付きボロノイ分割による逆点描画を図2.9(b)に示す。この重み付き距離によるセル境界は、母点間の2等分ではなく、重みによる内分になり、重み D が小さい母点に近くなるので、エッジの偏移が減る。この重み付きボロノイ分割による逆点描結果は図2.9(b)となり、エッジからのはみ出しが完全にはなくなっていないが、図2.9(a)よりは小さい。このように逆点描処理には重み付きボロノイ分割が適している。

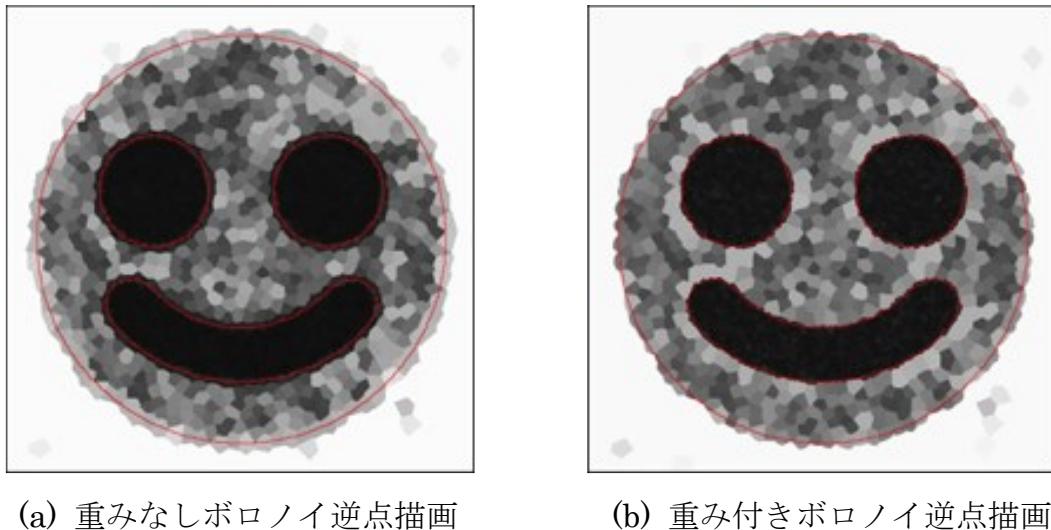


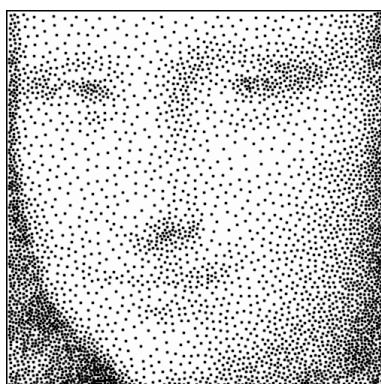
図2.9 ボロノイ分割による図2.5(a)の逆点描結果

Fig.2.9 Inverse stippling of Fig.2.5(a) by Voronoi tessellation.

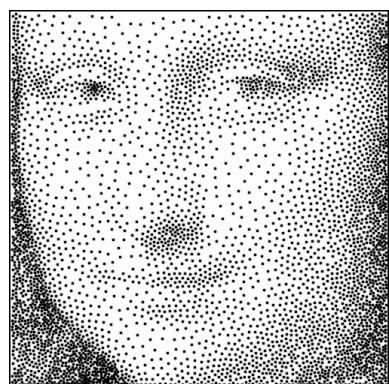
2.4 実験結果



(a) 入力画像



(b) ランダム順 PDS による点描画



(c) 画素値順 PDS による点描画



(d) 図(b)の重み付きボロノイ逆点描画



(e) 図(c)の重み付きボロノイ逆点描画

図 2.10 Mona Lisa の点描画と逆点描結果

Fig.2.10 Stippling images and inverse stippling images of Mona Lisa.

結果から見ると、逆点描結果でも、従来のランダム順PDSよりも提案法の画素値順PDSのほうが入力画像の再現性が高いことが分かる。

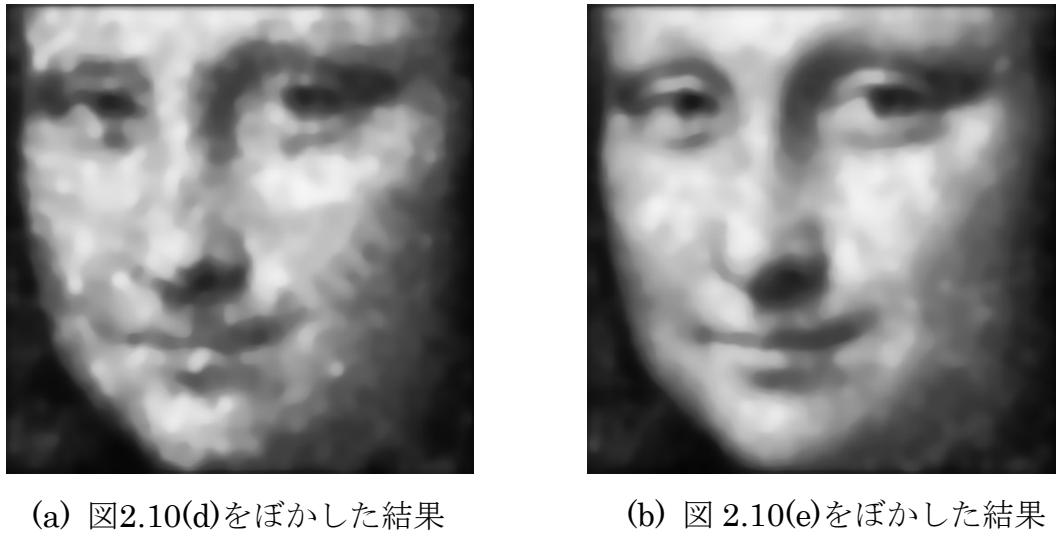
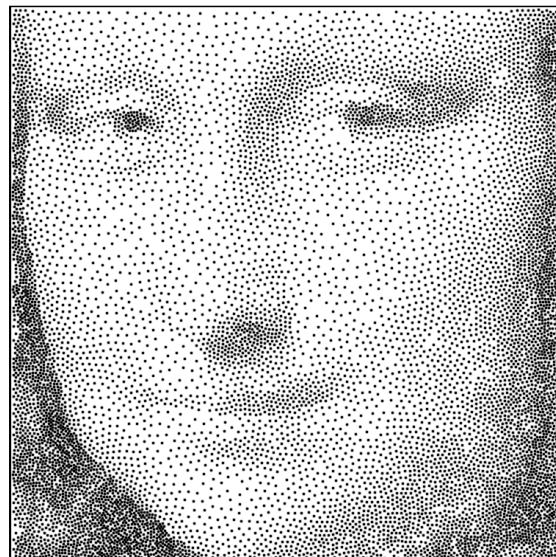


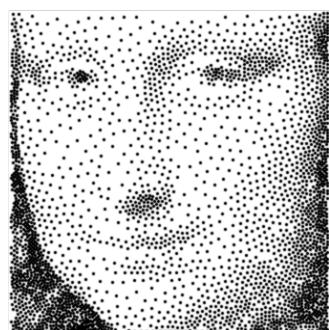
図2.11 逆点描をぼかした結果

Fig.2.11 Blurred results of the inverse stippling images.

それらをぼかした画像を再び利用し、縦横3/2倍に拡大してから点描画にした結果を図2.12(a)に示す。ぼかした画像を縦横2/3に縮小してから点描画に変換した結果を図2.12(b)に示す。結果から見ると、点密度に大きなムラも生じず、ほぼ良好に拡大・縮小できている。



(a) 縦横3/2倍に拡大した点描画



(b) 縦横2/3に縮小した点描画

図2.12 拡大・縮小した点描画

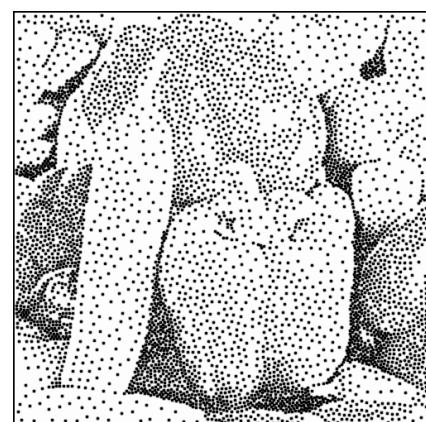
Fig.2.12 Expanded-reduced inverse stippling images.



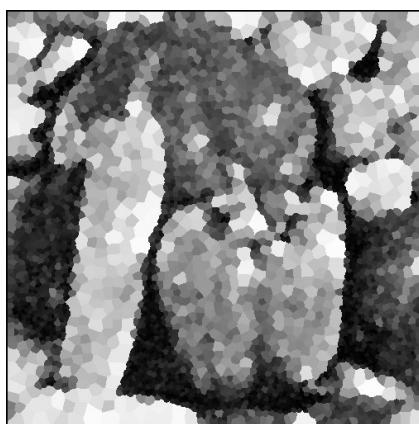
(a) 入力画像



(b) ランダム順PDSによる点描画



(c) 画素値順 PDS による点描画



(d) 図(b)の重み付きボロノイ逆点描画



(e) 図(c)の重み付きボロノイ逆点描画

図2.13 Peppersの点描画と逆点描結果

Fig.2.13 Stippling images and inverse stippling images of peppers.

画像をぼかした結果は以下のようになる。

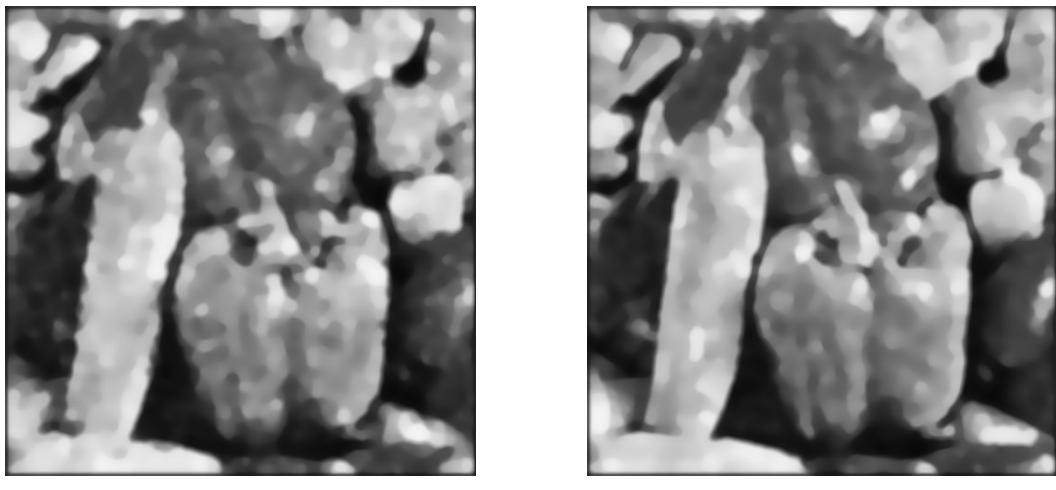
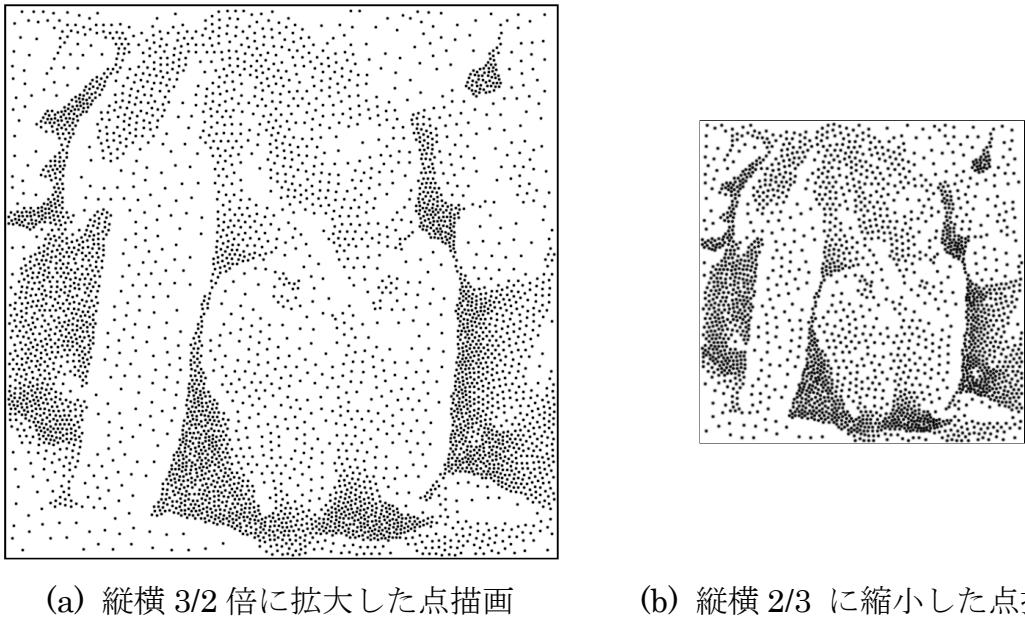


図 2.14 逆点描をぼかした結果

Fig.2.14 Blurred results of the inverse stippling images.

ぼかした画像を縦横 $3/2$ 倍に拡大してから点描画にした結果を図2.15(a)に示す。ぼかした画像を縦横 $2/3$ に縮小してから点描画に変換した結果を図2.15(b)に示す。



(a) 縦横 $3/2$ 倍に拡大した点描画 (b) 縦横 $2/3$ に縮小した点描画

図 2.15 拡大・縮小した点描画

Fig.2.15 Expanded-reduced inverse stippling images.

2.5まとめ

暗い画素から順番に点を打っていく画素値順PDSによる点描画の生成法を提案し、通常のランダム順のPDSよりもエッジの保存性や入力画像の再現性が高いことを実験で示した。また、点描画の各点を母点とする重み付きボロノイ分割による逆点描法を提案した。

第3章

非等方PDSによる適応的な点形状 の点描画

3.1 はじめに

前章で示した通り、ノンフォトリアリストイックハーフトーン技術の一つとしての点描画はグレースケールとカラー画像の2種類に分けられる。グレースケール画像に対しては、多くの手法が提案されている。

よく使われるものは、図3.1(a)のように白い背景の上に黒い小さな点のパターンを並べる手法である。黒い点と白い背景の面積の割合によって物体の各部分の明るさが決まるので、物体の各部分をグレースケールの明暗差で表現することができる。このような手法で生成した点描画では、すべての点は丸い点であり、点と点の間に距離があるので、離散的な点で物体内部の曲線の流れや領域の方向などを表示することは困難である。その結果、複雑な物体または複数の物体に対して、エッジや輪郭を現すのは難しい[17]。

Fengら[23]はポアソンディスク分布による離散的な橢円で2次元の物体を表現する手法を提案した。ポアソンディスク分布により、重なり合わない橢円を配置する。そして、非等方Lloyd緩和法に基づき、ボロノイセルと重心を計算して橢円の位置を最適化する。普通の等方円より橢円の方がエッジに沿って引き延ばされるので、エッジの乱れが減少する。しかし、これは一般的な点描画の手法ではない。

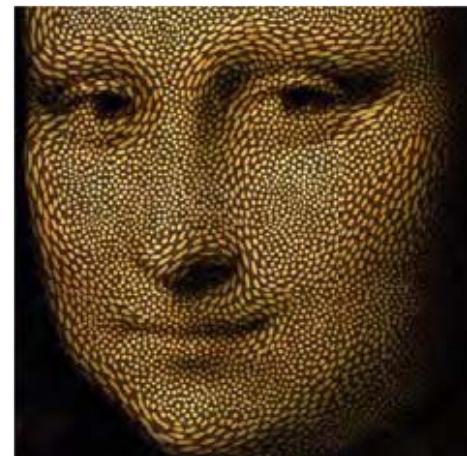
Hillerら[24]は、通常の丸い点をセグメントや三角などのマークに入れ替え、様々なマークと丸い点を合わせてユニークな点描画を生成する手法を提案した。最初に点とマークを配置する。そして、Lloyd緩和法に基づき点とマークの位置

を移動すると同時に、ボロノイセルによって、モーメントと主慣性軸を計算して、マークの向きを調整する。これによって、マークと点の分布と向きを全体の勾配場に従って配置することも可能であり、物体内部の曲線の流れを表示することもできる。しかし、それらのマークの種類や長さなどの情報を事前に設定する必要があるが、具体的な画像内容によって変更することもできない。

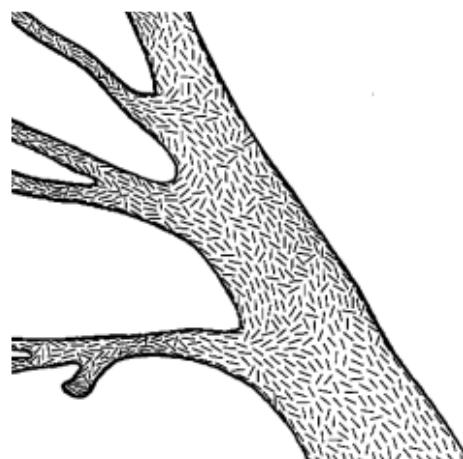
そこで、本稿では、人間の視覚に基づいて物体の詳細部分と輪郭を強調するために、前章に述べた画素値順によるPDS点描に基づき、非等方画素値順によるPDSで点を配置し、物体のエッジや輪郭などの特徴に応じて適応的な形を持つ点描画を生成する手法を提案する。点描画において各点間のバイラテラル距離を考え、点の勾配によって適応的な非等方円を描く。エッジ付近ではディスクをエッジに沿って引き延ばす方がエッジの乱れが減少するので、等方円より非等方円のほうがエッジや輪郭の保存性が向上し、画像構造の表現性が高い。



(a) 一般の点描画[51]



(b) 楕円による点描画[58]



(c) セグメントによる点描画[24]

図.3.1 以前の方法による点描画

Fig.3.1 Stippling images by previous methods.

3.2 非等方画素値順PDS

点を配置するために、本章では、非等方画素値順PDS手法を提案する。そのために、等方PDSでの画素間のユークリッド距離をバイラテラル距離

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + \alpha * (d_i - d_j)^2} \quad (\alpha > 0) \quad (3.1)$$

に変える。ここで x_i, y_i と x_j, y_j は画素 i, j の x 座標と y 座標であり、 d_i, d_j はぼかした入力画像の画素値である。ぼかす理由は、エッジの付近で非等方性が過剰に強くなりすぎるので、勾配の変化を緩めるためである。しかし、そうすると上記の等方PDSの時と同じく $r_i = a + b * d_i$ とすると、エッジ近辺に点が密集して、結果の画像が黒くなる。そのためには、点の密度が一様になるように修正する必要がある。そこで、第2章に述べた画素値順PDSでは半径 r は全ての画素で同じ値にしていたが、画素 i での半径を

$$r_i = (a + b * d_i / 255)[1 + \alpha(g_{xi}^2 + g_{yi}^2)]^{1/4} \quad (3.2)$$

とする。 $[g_{xi}, g_{yi}]^T$ は画素 i の勾配ベクトルである[25][26]。勾配ベクトルはぼかした入力画像にソーベルフィルタをかけて求める。非等方画素値順PDSの手順は以下の通りである。画像のサイズ(総画素数)を n とする。

1. 各画素 r での半径 r_i を設定する。
2. 各画素の値 d_i に値が 0 以上 1 以下の一様乱数 m_i を加えて $f_i = m_i + d_i$ とする。

3. f_i が小さい順番に、全ての画素に番号 $k (= 1, 2, 3 \dots, n)$ を付ける。
4. $k = 1$ の画素に点を打つ。
5. k を 1 増やす。 $k = n$ なら終了。 $k < n$ ならステップ 6 へ。
6. 番号が k の画素 i を中心として他の既に打った点 j との距離 d_{ij} を計算し、すべての距離は $d_{ij} > r_i$ なら、その画素に点を打ってステップ 5 へ。なければ点を打たずにステップ 5 へ。

3.3 非等方円による点描画の作成

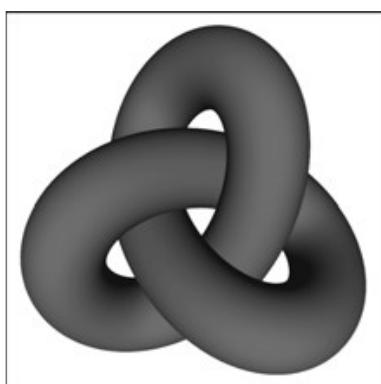
上記の非等方画素値順PDS手法で点を配置した後、それらの点を中心とする半径

$$r_i = (a + b * d_{min}/255)[1 + \alpha(g_{xi}^2 + g_{yi}^2)]^{1/4} \quad (3.3)$$

の円を塗る。 d_{min} はすべての画素値の最小値である。円を塗る時の距離もバイラテラル距離 $\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + \alpha * (d_i - d_j)^2}$ ($\alpha > 0$) を使うので円は歪んだ形になる(半径 r_i で描画すると入力画像の暗いところのディスクが重なって全面が黒くなるので r_i の $4/5$ で描画している)。ユークリッド距離とバイラテラル距離の違いを図3.2に示す。図3.2(b)は図3.2(a)の一部である。図3.2(c)のように、等方PDS ($\alpha = 0$)ではディスクは円である。非等方PDSで描いた歪んだ楕円(非等方円)を図3.2(d)に示す($\alpha = 0.8$)。この非一様円の生成で用いる非等方距離は、従来の非等方点配置法[57][58]で用いられる2次元 (x, y) 空間での2次形式距離

$$\left\{ [x_i - x_j, y_i - y_j] G [x_i - x_j, y_i - y_j]^T \right\}^{1/2} \text{ とは異なる。 } 2\text{次形式距離は、 } \text{どの画素で}$$

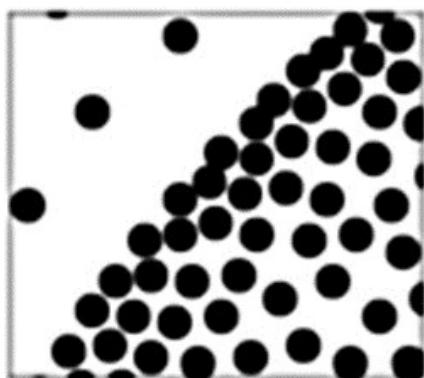
の計量行例を G とするかで不定性があり、 i と j について非対称であり、三角不等式も満たさないが、バイラテラル距離は一意で対称であり、三角不等式も満たす。2次形式距離で生成される橈円は回転しているだけであるが、バイラテラル距離で生成され各円には、回転に加えて非線形な形状歪みも生じている。これは、2次形式距離の橈円は通常の2次元形状であるのに対し、バイラテラル距離の円は画像表面と3次元球との交線を画像平面(x, y)に投影した閉曲線であることの違いによる。なお画像表面とは3次元空間(x, y, d)内で画素値(x_i, y_i, d_i)が成す2次元曲面である。具体的な例を付録Cに挙げる。



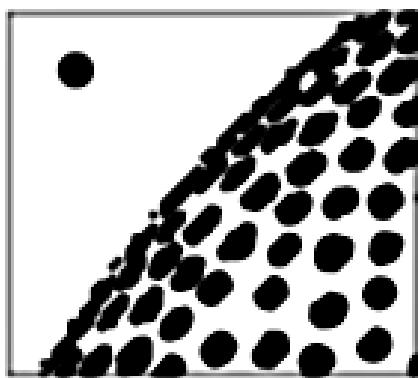
(a) 元画像



(b) 図(a)の一部



(c) 図(b)の等方画素値順 PDS 結果

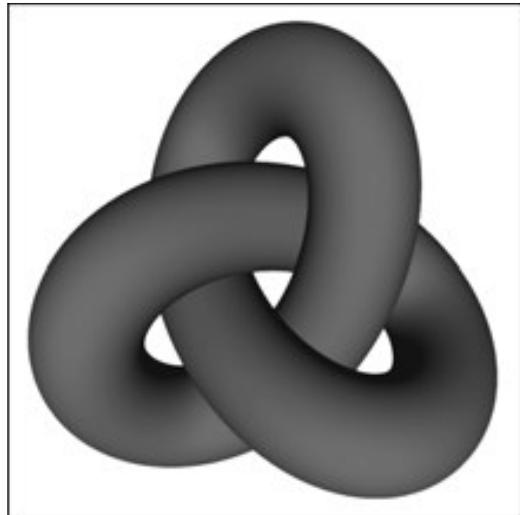


(d) 図(b)の非等方画素値順 PDS 結果

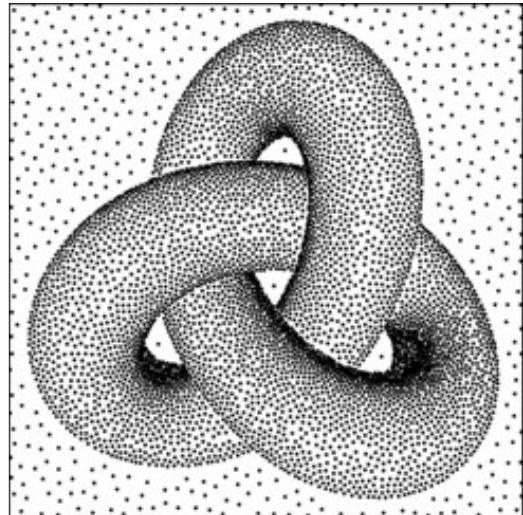
図.3.2 等方 PDS による点描画像と非等方 PDS による点描画像

Fig.3.2 Stippling images of isotropic PDS and that of anisotropic PDS.

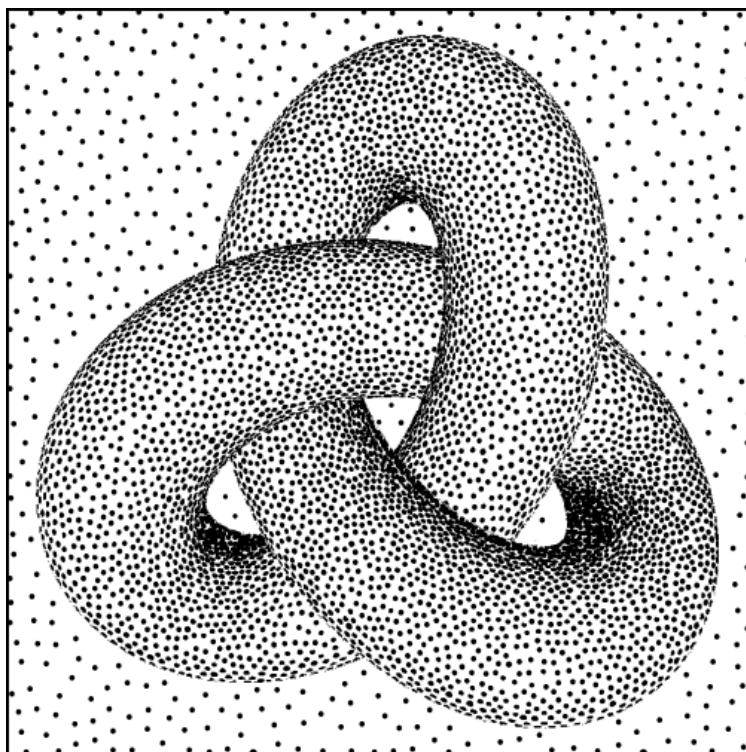
3.4 実験結果



(a) 入力画像



(b) 等方画素値順 PDS による点描画



(c) 非等方画素値順 PDS による点描画

図.3.3 CG 画像の点描結果

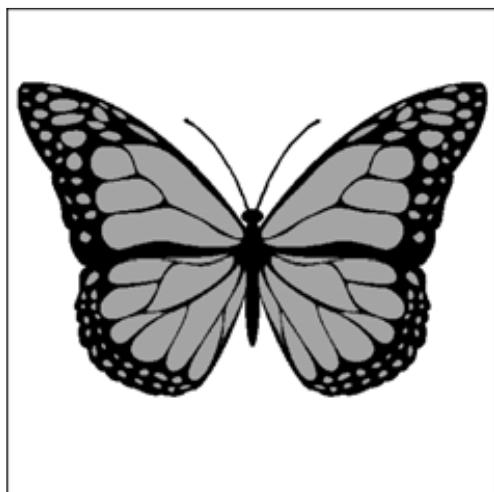
Fig.3.3 Stippling of computer graphics image.

一つの画像例での実験結果を図3.3に示す。図(a)は入力画像で、図(b)は等方画素値順PDSによる点描画であり、図(c)は非等方画素値順PDSによる点描画である。図(b)と図(c)には、半径に関して同じ a と b の値を使っている。(以下の実験では、等方画素値順PDS点描法と非等方画素値順PDS点描法の a と b も同じ値を使う)。図(c)は $\alpha=0.5$ での結果である。非等方画素値順PDS点描法の結果には、点描の3d形状データが強化され、輪郭の付近での非等方円はエッジに従つて歪んでいる。これにより、等方画素値順PDS点描法の結果より非等方画素値順PDS点描法の結果の方が輪郭の保存性が高い。

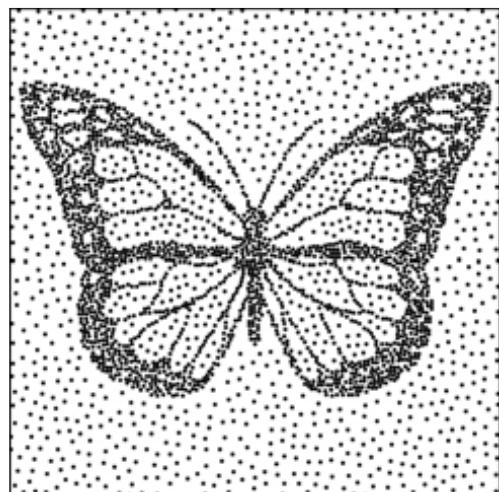
次の実験を図3.4に示す。図(a)は入力画像で、図(b)は等方画素値順PDSによる点描画であり、図(c)は非等方画素値順PDSによる点描画である。図(c)では $\alpha=0.1$ である。図(a)では蝶の触角が細長いので、等方画素値順PDS点描法で描いた結果より、非等方画素値順PDS点描法で生成した結果では、触角の曲線だけでなく、その黒い頂点まで表現できている。また、蝶の頭部も非等方画素値順PDS点描法でははっきり見える。結果からみると、本章で提案した非等方画素値順PDS点描法で、細い物体を再現することができる事が分かる。

3番目の実験結果を図3.5に示す。 $\alpha=0.1$ とした。入力画像は図(a)であり、等方画素値順PDSによる点描画が図(b)である。それと比べて、非等方画素値順PDSによる点描画の図(c)の方が、グレースケールの勾配に沿って非等方円で物体の輪郭の3D形状を表現できるので、物体の輪郭付近の保存性が向上している。

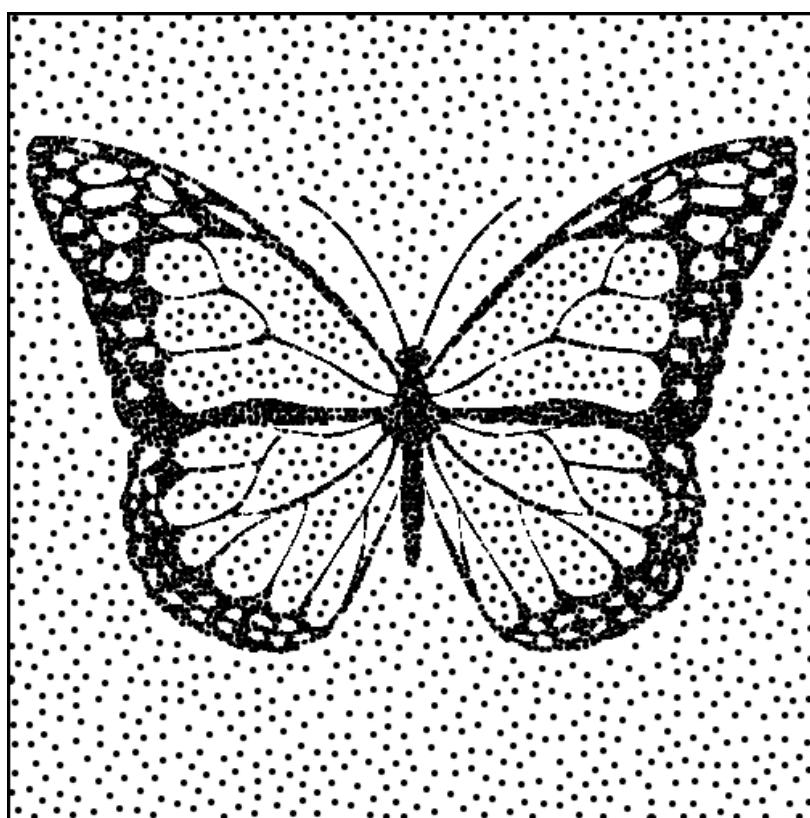
最後の例は、図3.6(a)のMona Lisaの画像に関する実験である。等方画素値順PDSによる点描画と非等方画素値順PDSによる点描画を図3.6(b)と図3.6(c)に示す。 $\alpha=0.2$ とした。図(b)の結果より、図(c)のほうが、眼や口及び顔の輪郭の保存性が高い。



(a) 入力画像



(b) 等方画素値順 PDS による点描画



(c) 非等方画素値順 PDS による点描画

図.3.4 蝶画像の点描結果

Fig.3.4 Stippling of butterfly image.

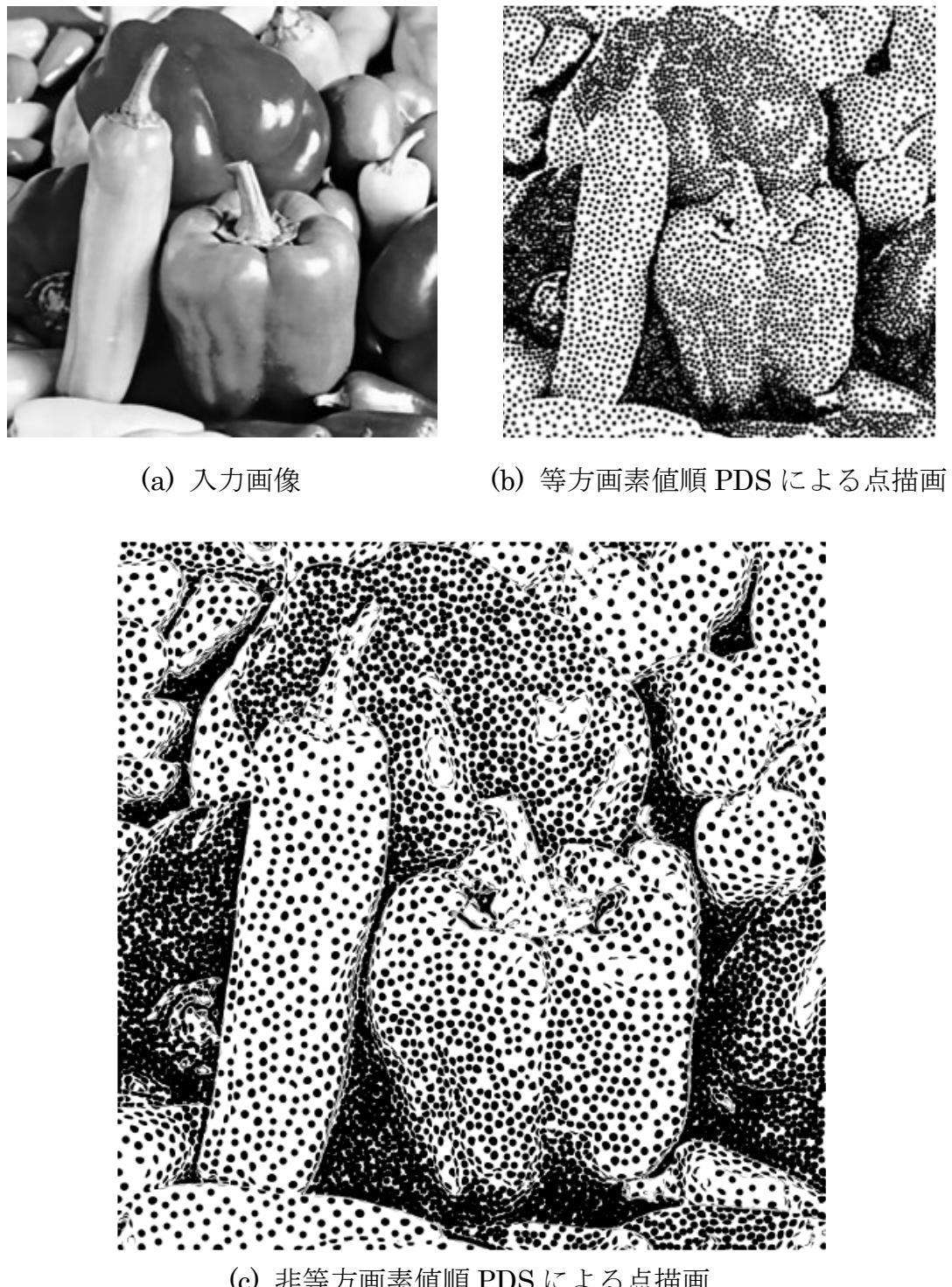
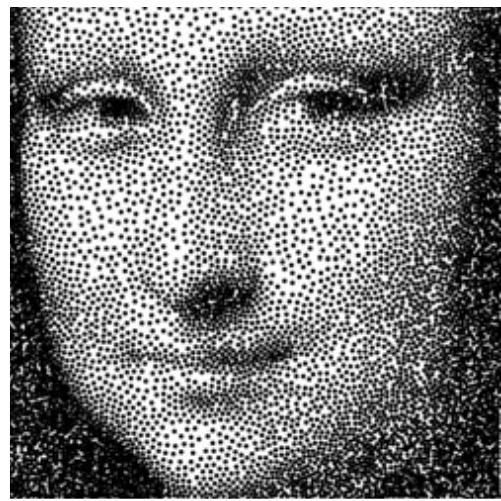


図.3.5 Pepper 画像の点描結果

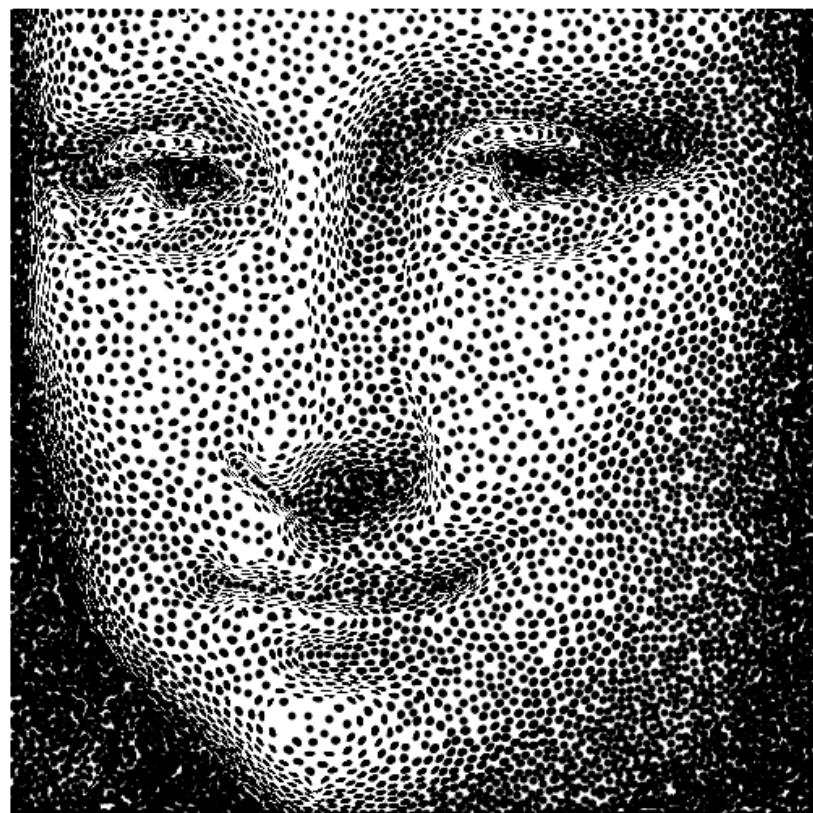
Fig.3.5 Stippling of pepper image.



(a) 入力画像



(b) 等方画素値順PDSによる点描画



(c) 非等方画素値順PDSによる点描画

図.3.6 Mona Lisa 画像の点描結果

Fig.3.6 Stippling of Mona Lisa image.

図3.7には、図3.3(c)、図3.5(c)と図3.6(c)の一部分を拡大した図を示す。これらの図では、非等方円は入力画像のグレースケールの勾配に沿って形状が変化している。エッジに近くなればなるほど、非等方円の形が自動的に円から線状セグメントに変えられる。特にエッジの付近では、非等方円の歪みが非常に強いので、エッジの流れや物体間の区別などを表現することができる。そして、入力画像の内容によって、非等方円の形も勾配に沿って自動的に変更できるので、従来法の結果より本稿で提案する手法はロバスト性が増す。

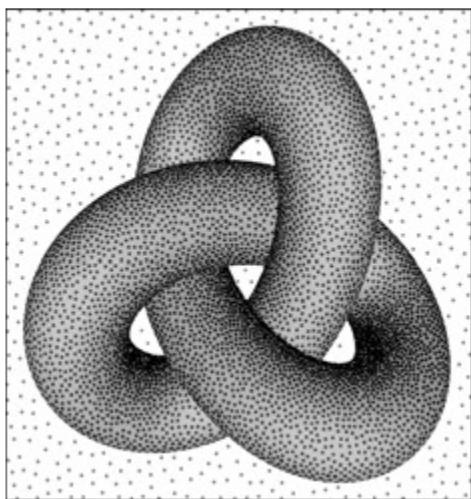


図.3.7 図.3.3(c), 図.3.5(c)と図.3.6(c)の一部を拡大した画像

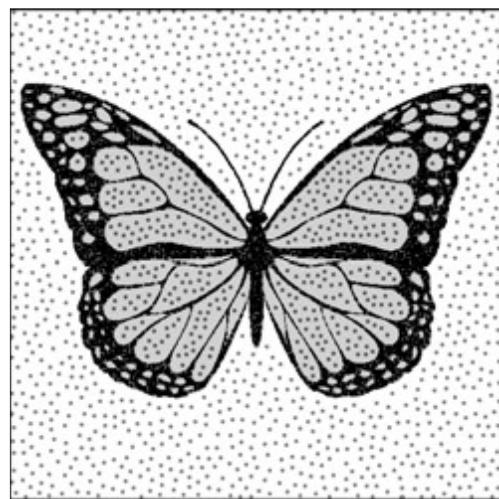
Fig.3.7 Magnified parts in Fig. 3.3 (c), Fig. 3.5 (c) and Fig. 3.6 (c).

非等方円の歪みと入力画像のグレースケールの勾配との一致性を確認するために、本稿で提案する非等方画素値順によるPDSの点描結果と入力画像を一緒に

に並べて、平均値画像を求める。上記の実験例の平均値画像を図3.8に示す。結果からみると、非等方円の歪みはきちんと入力画像のグレースケールの勾配に合っているので、本稿で提案する手法の有効性が確認できる。



(a) 図3.3の平均値結果



(b) 図3.4の平均値結果



(c) 図3.5の平均値結果

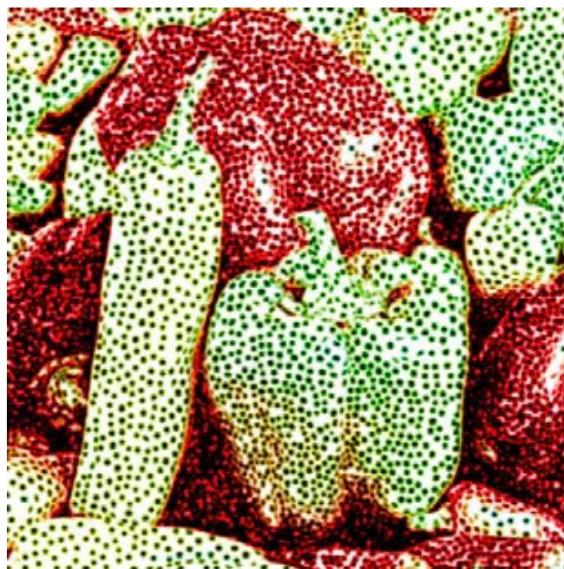


(d) 図3.6の平均値結果

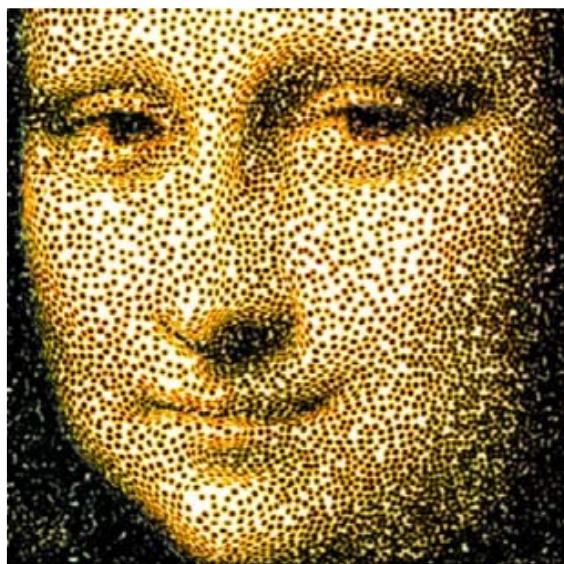
図3.8 入力画像と点描画の平均値結果

Fig.3.8 Averages of inputs and their stippling images.

最後に点描画に色を付けて図3.1(b)のような画像を生成する。結果を図3.9に示す。図3.1(b)と比べて、図3.9の結果では、エッジに近いところで非等方円のサイズが小さいので、エッジを表現しやすい。



(a) 図3.5のカラー結果



(b) 図3.6のカラー結果

図3.9 カラー結果

Fig.3.9 Rendering Technique Results.

3.5まとめ

非等方画素値順PDSで点を配置し、物体のエッジや輪郭などの特徴に応じて適応的な形を持つ点描画を生成する手法を提案し、等方円より非等方円のほうがエッジや輪郭の保存性が向上し、画像構造の表現性が高いことを実験で示した。

第4章

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

4.1 はじめに

実際のステンドグラスは、ステンドとガラスの境界により、輪郭線などの特徴を表し、各ガラス領域はおむね凸多角形と曲線で構成されている。現在、コンピュータの普及に伴い、写真など写実的な画像をステンドグラス風画像に変換する芸術的フィルタが多くのフォトレタッチソフトに組み込まれている。

図4.1に実際のステンドグラスの一例を示す。ガラスの破片を組み合わせて作られており、ガラスの破片が直線的な輪郭を多くもつたため、ステンドグラスも直線的な境界線をもつ。それに対して、図4.2に示すような、具体的な景物が描かれているステンドグラスでは、曲線的な境界線をもつものがほとんどである。

画像の再現性にはエッジの保存性が重要である。そのようなステンドグラス画像を生成するために、ボロノイ図を用いてステンドグラスの境界線を描く。しかし、従来の手法の等方ボロノイ図ではエッジを挟んで母点を配置することが必要であり、境界線は直線の折れ線となるので、高速な処理ができるが、実際のステンドグラスとは必ずしも似ていない。また、入力画像によらずランダム順で母点を配置し、等方ボロノイ図を用いてステンドグラス風画像を生成するので、入力画像の再現性が低く、セルの大きさが均一で表現能力が乏しい。

芳賀ら[10]は、保存性を向上するために、反複で母点を配置し直す手法を提案しているが、反複修正によるアルゴリズムでは計算時間がかかる。また、等方ボロノイ図を使うので再現性を保つには多数のセルを必要とする。直線の折れ線で入力画像を表現するので、曲線の部分を表示することは難しい。Seoらは画

像を領域分割し、領域ごとにセルの大きさを変えているが、ユーザによる指示入力を要し、自動的な操作ではない。

辻本ら[11]は入力画像のエッジに柔軟に対応するために、母点の反復修正を要せず、入力画像のエッジの距離変換から骨格を抽出し、骨格画素の中から母点を選択し、その母点の距離値の逆数を重みとする乗法的重みつきボロノイ図を求めて、一つの領域を一色で表す。画像の再現性は等方ボロノイ図手法よりも向上する。しかし、この手法では、細かいエッジも再現するようにセル分割されるので、多数の細かいセルが得られる傾向が強い。主要なエッジだけを検出するのが困難である。

王ら[31][32]は母点配置も非等方重心ボロノイにする手法を提案した。すなわち、非等方重心ボロノイで配置した母点に基づいて非等方重心ボロノイセルに分割する（上記[10][11]の手法のボロノイセルは等方ボロノイセルである）。点配置も非等方重心ボロノイにすれば、点が入力画像の色分布に従って配置されるので、物体輪郭の保存性が更に高まる。しかし、母点を非等方重心ボロノイ配置に動かすために、計算時間が長い。

上記の手法からみると、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や骨格画素から母点を選ぶ手法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。

また、実際のステンドグラスでは図4.3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。従来の非等方ボロノイ分割では、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ので、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。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4.1 境界線が直線的なステンドグラスの例

Fig.4.1 Example of stained glass with straight boundary line.



図4.2 境界線が曲線的なステンドグラスの例

Fig.4.2 Example of stained glass with curve boundary line.



図4.3 複数のセルを持つステンドグラスの例

Fig.4.3 Examples of stained glass with multiple cells.

4.2 4分木分割による母点配置

従来の非等方ボロノイ分割では、適当な数の母点を一様に配置したが、本稿では入力画像を4分木分割して求める。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。これは微細なセルが密集して生成されないようにするためである。すなわち、通常の4分木分割では入力画像の近似誤差が問題になるが、本稿では近似誤差を犠牲にしてもセルの大きさと密度を優先させる。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4.4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 $l * a * b$ 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)。

図4.5(a)に示す単純な画像(500 * 500)で得られた46個の母点を図4.5(b)に示す。
 $\sigma_T^2 = 4000$, $r_T = 50$ とした。図4.6(a)に示す画像(563 * 422)で得られた母点を図4.6(b)に示す。 $\sigma_T^2 = 220$, $r_T = 22$ とした。

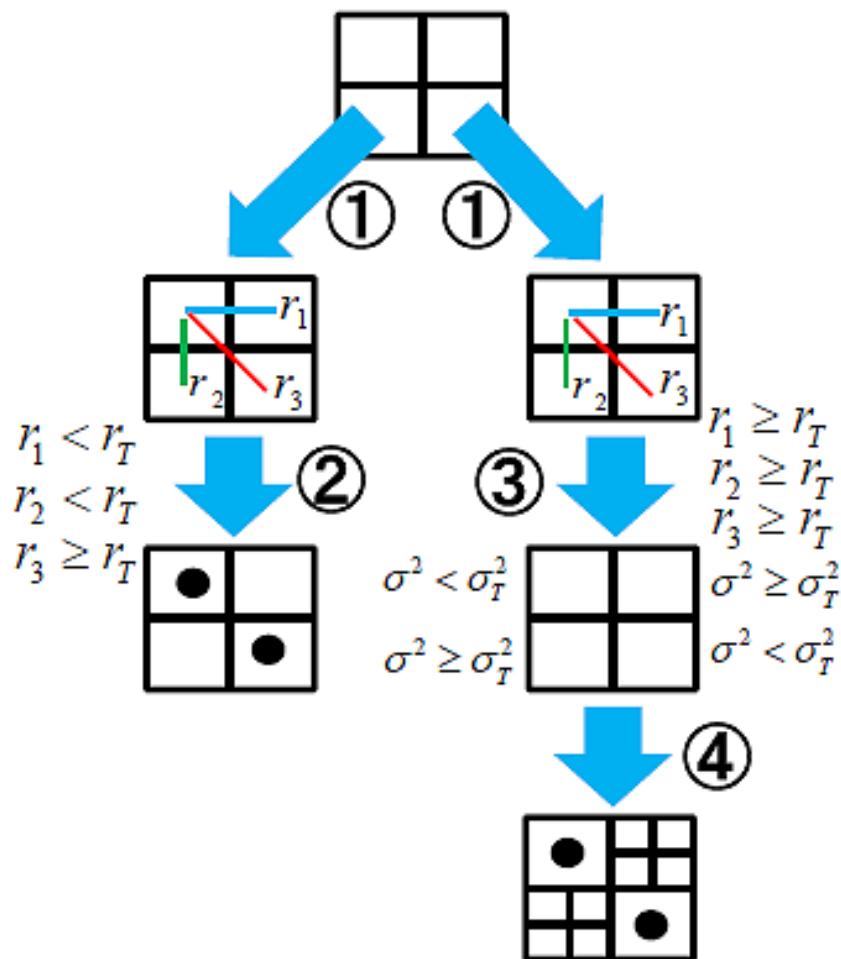
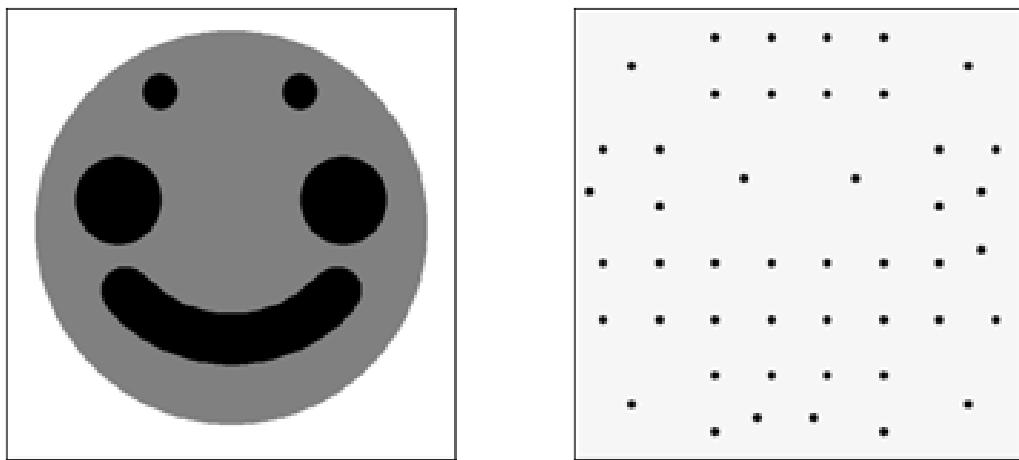


図4.4 4分木分割

Fig.4.4 Quad-tree decomposition.

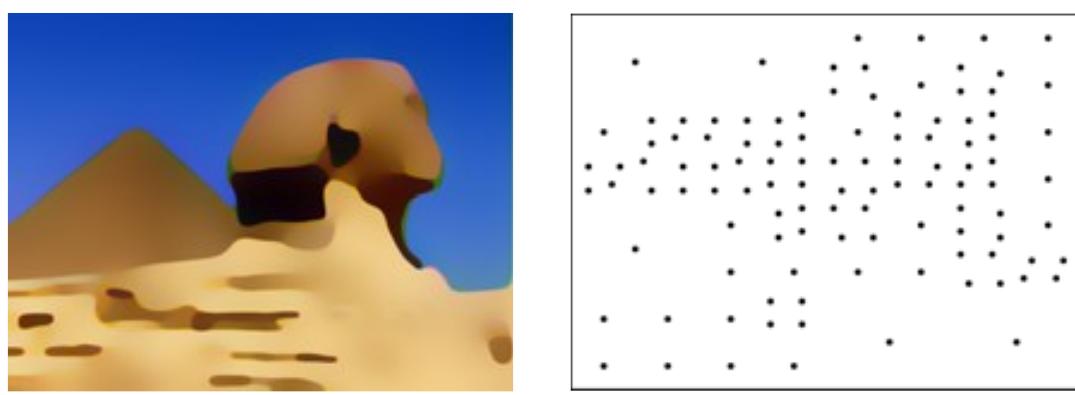


(a) 入力画像

(b) 4分木分割で得られた母点

図4.5 4分木分割で得られた母点の例1

Fig.4.5 Example 1 of generating point by Quad-tree decomposition.



(a) 入力画像

(b) 4分木分割で得られた母点

図4.6 4分木分割で得られた母点の例2

Fig.4.6 Example 2 of generating point by Quad-tree decomposition.

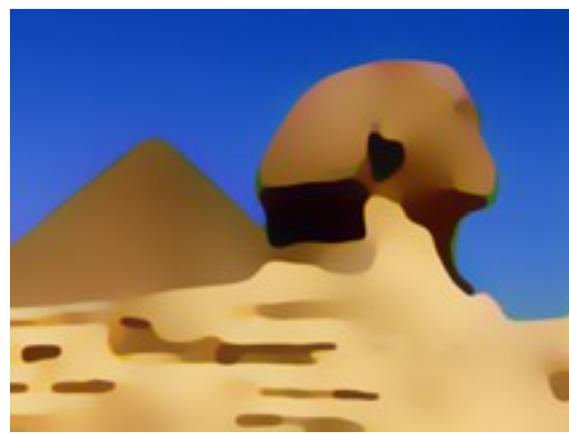
4.3 非等方ボロノイ分割

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ほかした画像の第*i*画素の(*x*,*y*)座標を(*x_i*,*y_i*)とし、色のCIELAB座標を[*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。また第*k*母点の位置と色を(*x_k*,*y_k*)と[*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

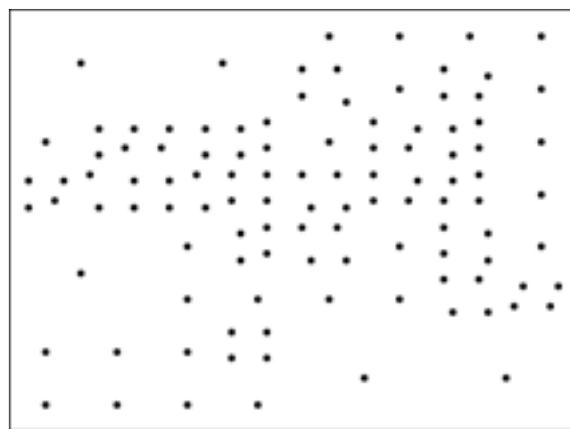
$$D_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + \alpha \|c_i - c_k\|^2} \quad (4.1)$$

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。非等方ボロノイ分割の結果を図4.7に示す。 α は5とした。所々に小さいセルが生成されている。また図4.7(c)の左下部を拡大した図4.7(d)のように、境界線が閉曲線で孤立したセル(セル境界を赤い線で示した楕円)が生じる。同様な孤立セルが生じる他の例を図4.8に示す(この例では、非等方性によって入力画像のエッジが完全に保存されている)。左が入力画像、中央が適応的AVTであり、下部中央の赤丸(拡大を右に示す(セル境界を青線にしている))が孤立している。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。



(a) 入力画像



(b) 4分木分割で得られた母点



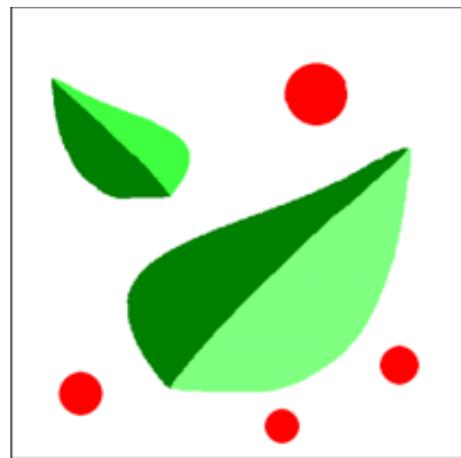
(c) 非等方ボロノイ分割の結果



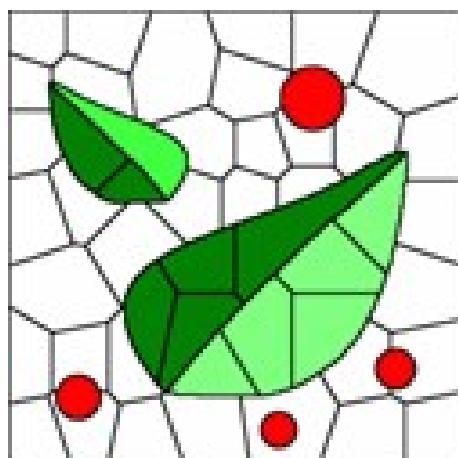
(d) 一部分を拡大した結果

図4.7 非等方ボロノイ分割の例

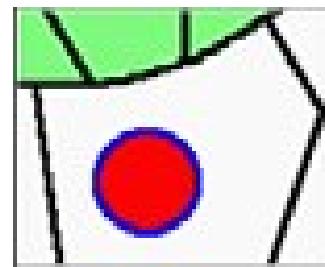
Fig.4.7 Example of anisotropic Voronoi tessellation.



(a) 入力画像



(b) 非等方ボロノイ分割の結果



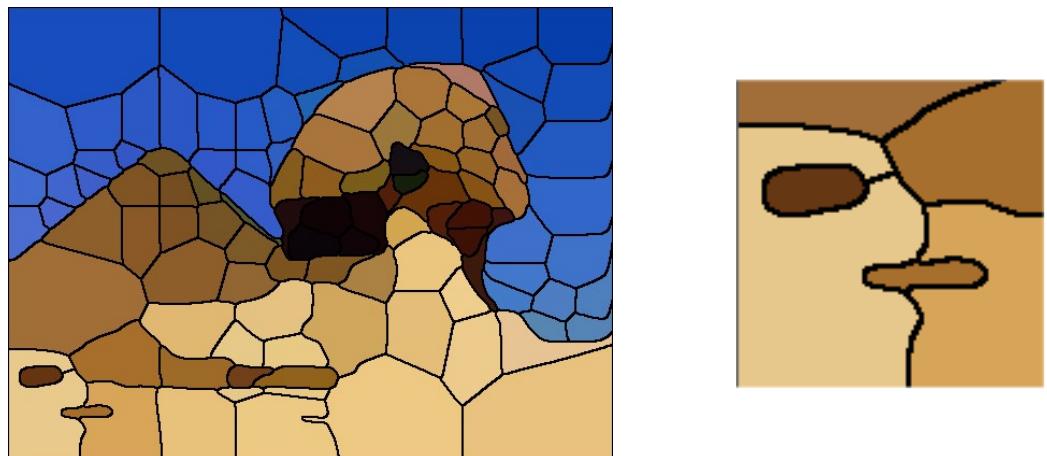
(c)一部分を拡大した結果

図4.8 孤立セルが生じる他の例

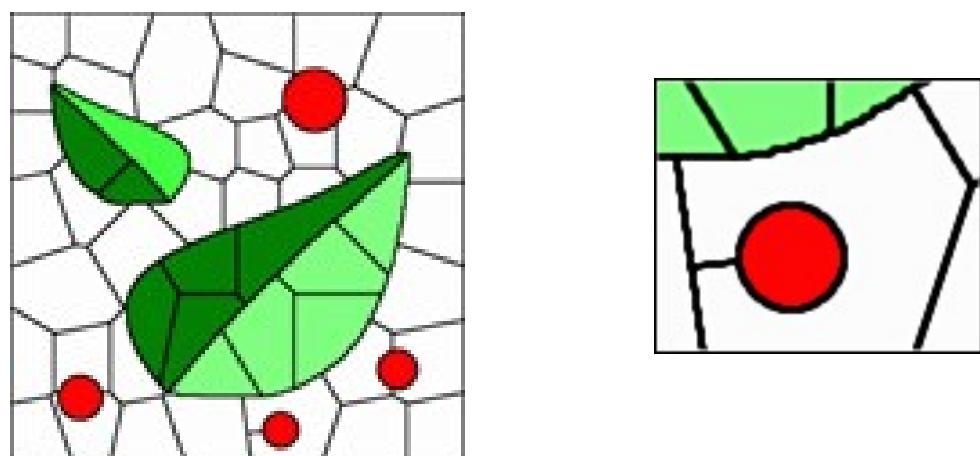
Fig.4.8 Another example of isolated cell.

4.4 微小セルの除去とセル境界の連結

そこで、セルの面積が閾値以下の母点を削除する。また、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と最短の線分で繋がれる。図4.7(c)から微小セルを削除して(面積の閾値は300とした)，境界線を連結したのが図4.9(a)，図4.8(b)の境界線を連結したのが図4.9(b)である。拡大図も示す。それぞれで孤立セルが近くの境界線と繋がっている。図4.10(a)は以前のAVT法での結果であり、セルの数は図4.10(b)が113個で、図4.10(a)個よりも少し多いが、入力画像の再現性(輪郭の保存性等)は図4.10(b)のほうが図4.10(a)よりも高い。



(a) 図4.7(c)を微小セルの削除と境界線の連結する結果



(b) 図4.8(b)を微小セルの削除と境界線の連結する結果

図4.9 微小セルの削除と境界線の連結

Fig.4.9 Removal of tiny cells and connection of boundary lines.

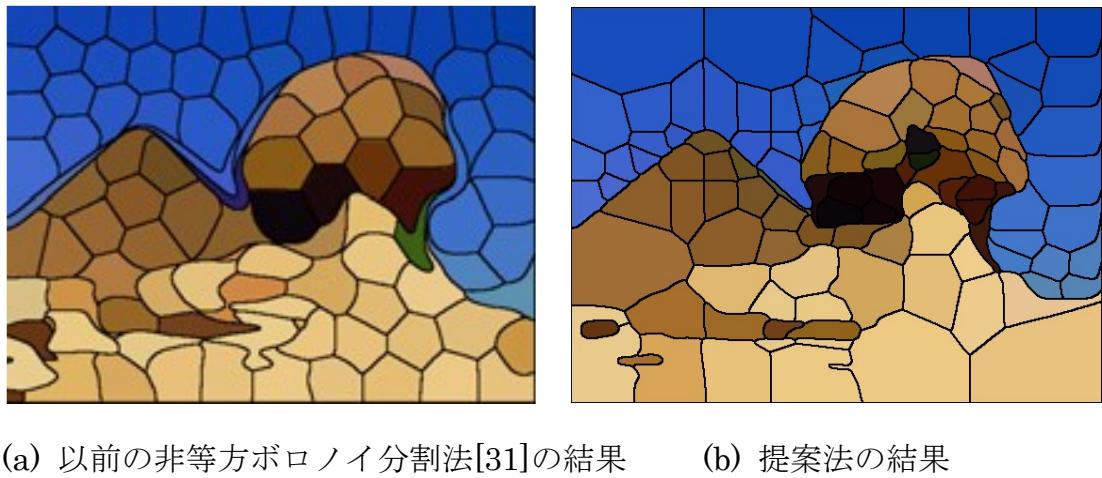


図4.10 以前の非等方ボロノイ分割法の結果と本稿の提案法の結果

Fig.4.10 Previous AVT and our method's result.

4.5 実験結果

図4.7(a)の画像は少し複雑なので、提案法ではセルの数が従来のAVT法よりも少し多くなっているが、図4.11(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4.11(b)が得られているが、提案法では図4.11(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。

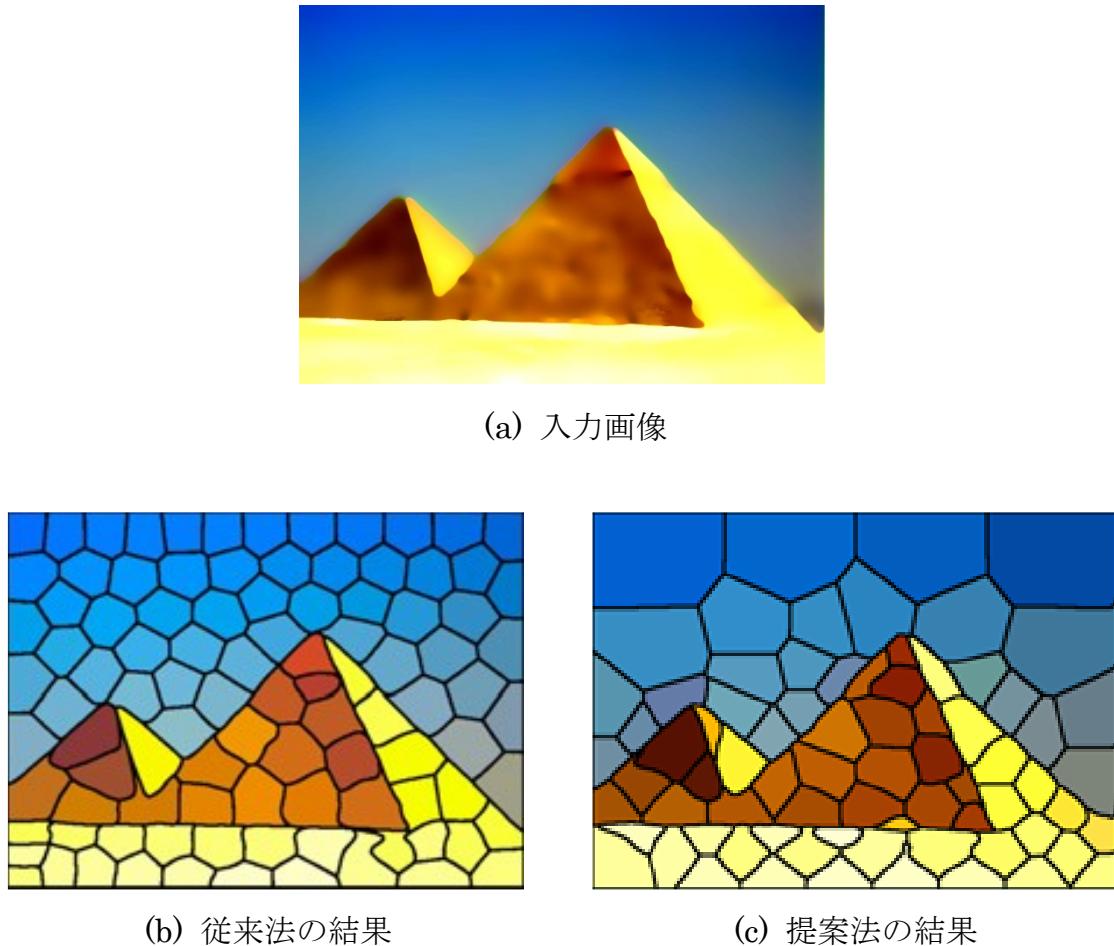


図4.11 入力画像が単純な場合

Fig.4.11 Example of simple input image.

図4.12と4.13では、4.12(a)(サイズは $386 * 342$)と4.13(a)(サイズは $424 * 424$)が入力画像、4.12(b)と4.13(b)が従来のAVT[31]、4.12(c)と4.13(c)が提案法である。セルの数は4.12(b)と4.13(b)が100個、4.12(c)は96個($\sigma_T^2 = 180$, $r_T = 50$, $\alpha = 5$, 面積の閾値=400), 4.13(c)は118個($\sigma_T^2 = 180$, $r_T = 50$, $\alpha = 10$, 面積の閾値=150)である。図4.12(b)では腹ビレと尾ビレが繋がってしまっているが、

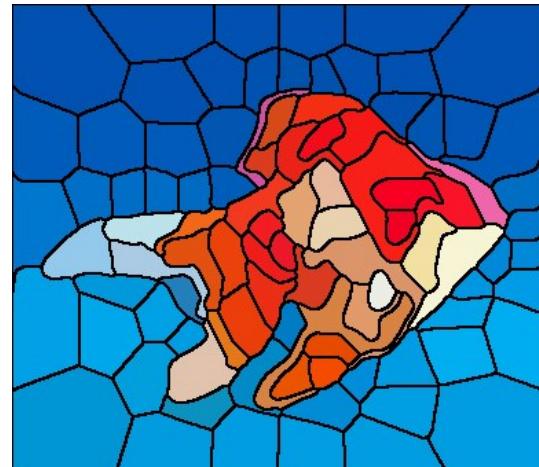
4.12 (c)では輪郭が保たれている。また、図4.13(b)ではセルサイズがほぼ均一であるが、4.13(c)では画像周辺で大きくなっている(しかし、山の中央付近では分割され過ぎている)。



(a) 入力画像



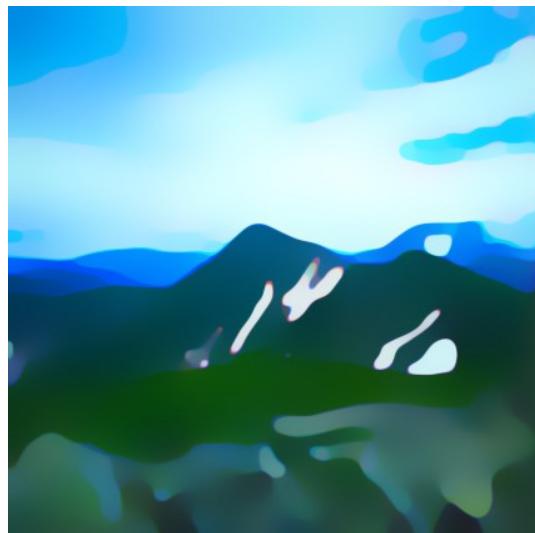
(b) 従来法の結果



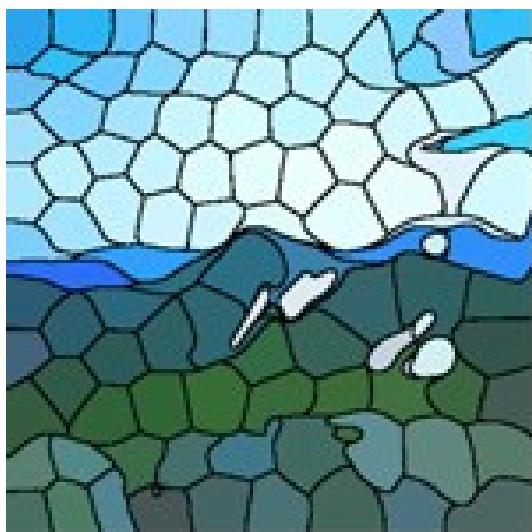
(c) 提案法の結果

図4.12 少し複雑な画像での従来AVT法との比較例1

Fig.4.12 Comparison 1 with previous AVT for moderately complex images.



(a) 入力画像



(b) 従来法の結果



(c) 提案法の結果

図4.13 少し複雑な画像での従来AVT法との比較例2

Fig.4.13 Comparison 2 with previous AVT for moderately complex images.

以上では従来のAVT法と比較したが、AVT以外の従来法とも比べてみる。図4.14は図4.12(a)の画像でのSeoらの結果である。図4.14ではセルサイズがほぼ均一で変化に乏しい。一方、図4.14では色が一様な画像周辺でセルが大きくなっている（しかし、金魚のなかではセル形状が複雑である）。図4.15(a)は図4.13(a)の画像でのMouldの結果である。図4.15(a)は図4.13(c)よりもセルの数が少ない（39個）ので、パラメータを $\sigma_T^2 = 200$, $r_T = 50$, $\alpha = 8$, 面積の閾値=1900にした提案法が図4.15(b)である（セル数は43個）。図4.15(a)では、セルの色が入力画像から大きく変えられているので、色の再現性は比較できないが、山の尾根の形状は4.15(b)のほうが再現性が高い。また、図4.15(a)ではガラス表面や鉛線の凹凸も表現しているが、それらの付加的な効果も本提案法では省略している。

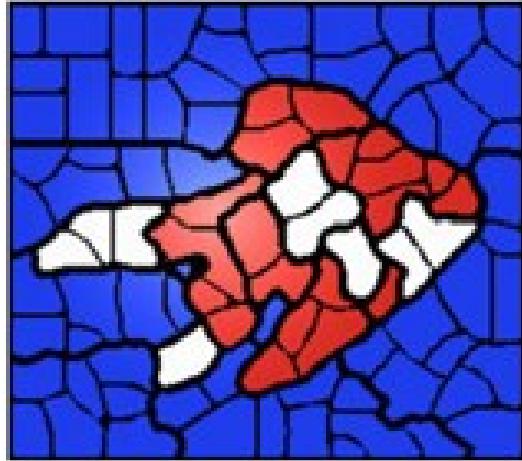


図4.14 図4.12(a)のSeoらの結果

Fig.4.14 Stained glass by Seo et al for Fig.4.14(a).

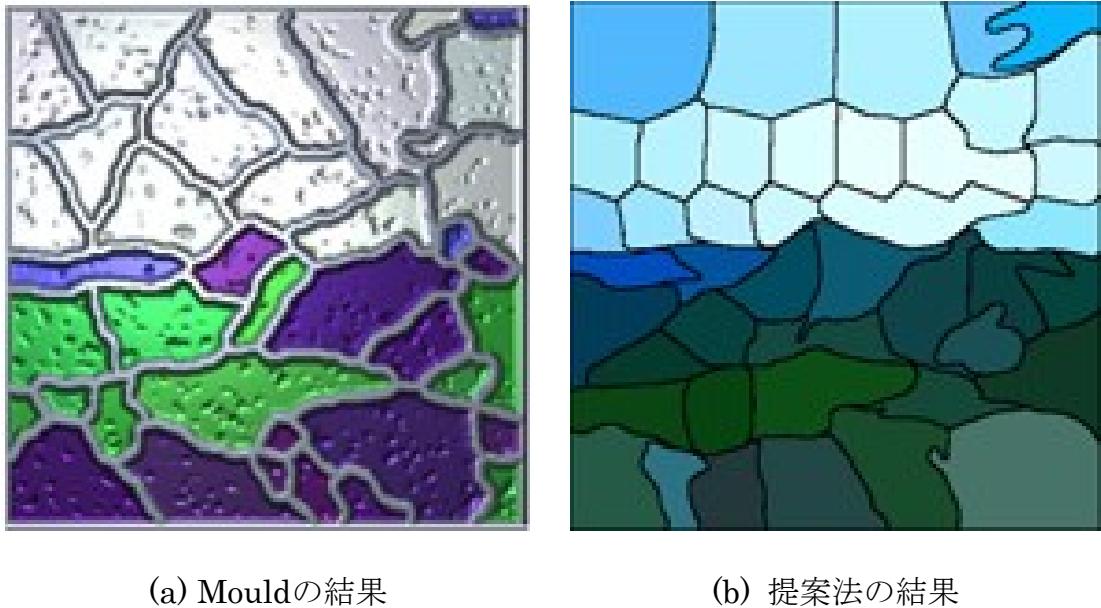


図4.15 図4.13(a)のMouldの結果との比較

Fig.4.15 Comparison with Stained glass by Mould for Fig.4.13(a).

図4.16では、(a)が入力画像、(b)がSeoの結果、(c)はMouldの結果、(d)が提案法($\sigma_T^2 = 250$, $r_T = 15$, $\alpha = 10$, 面積の閾値=700)である。SeoらもMouldと同様に、セルの色を入力画像から変えているので、色の保存性は比較できないが、ヨットの船体が図4.16(b)や(c)では海と癒着してしまっているが、図4.16(d)では保存されている。また空の周辺部でも図4.16(b)では均一サイズのセルが並んでいるが、(d)ではサイズが大きくなっており、無駄なセルが省かれている(但し、ヨット内部では複雑な形状のセルがある)。

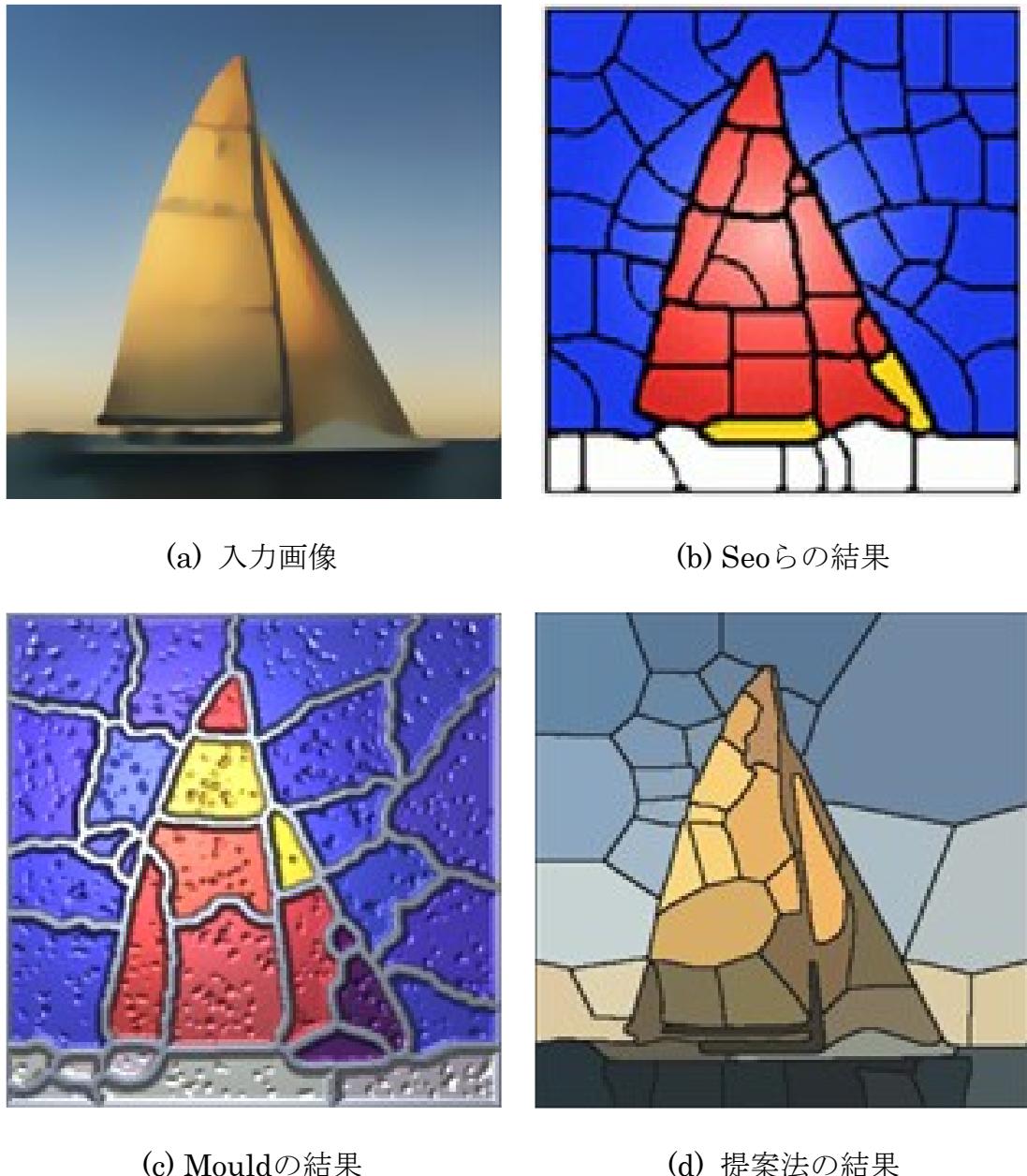


図4.16 SeoらとMouldとの比較

Fig.4.15 Comparisons with Seo et al. and Mould.

図4.17では、(a)が入力画像($650 * 415$)、(b)は辻本らのアポロニウス(すなわち重み付き等方ボロノイ)分割、(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4.17(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4.17(c)は微小なセルではなく、入力画像の保存性も比較的高い。

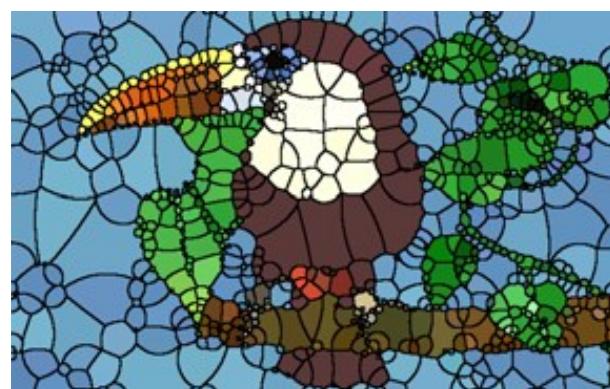
図4.18は、4.18(a)が入力画像、(b)は芳賀らの結果、(c)が提案法($\sigma_T^2 = 150$, $r_T = 5$, $\alpha = 0.8$, 面積の閾値=230)である。図4.18(b)ではセルサイズが均一であるが、4.18(c)ではサイズが適応的に変化しており、雌蕊や雄蕊の細かい再現性も4.18(c)のほうが高い。しかし、セルが複雑に入り組んでおり、セル形状の単純さでは4.18(c)は4.18(b)よりも劣る。

最後に、上記の図4.10(b), 4.11(c), 4.12(c), 4.13(c), 4.17(c)と4.18(c)に照明と凹凸を付けたステンドグラス風画像を図4.19に示す。

以上のように、提案法は物体輪郭の保存性など入力画像の再現性は高いが、輪郭の保存性とセル形状の単純性とはトレードオフ関係にある。提案法は、色が一様な所では等方的になり、セル境界はほぼ直線になるのでセル形状は単純であるが、色の変化が激しい所では、セルが色境界に沿って歪むので複雑に入り組むときがある。色の均一性に応じて場所によって α の値を変えると、セル形状の単純さと輪郭の保存性とが両立できる可能性がある。



(a) 入力画像



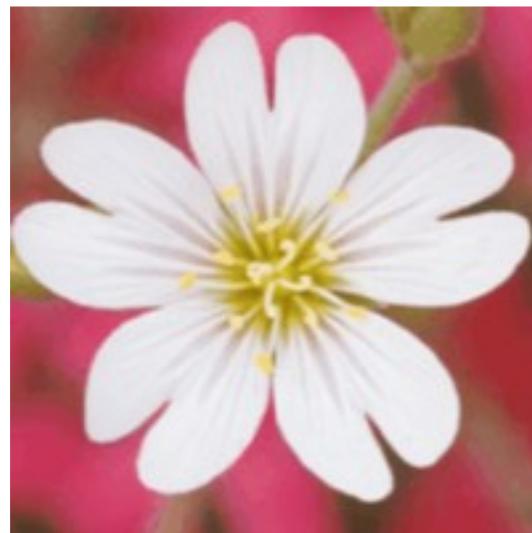
(b) 重み付き等方ボロノイの結果



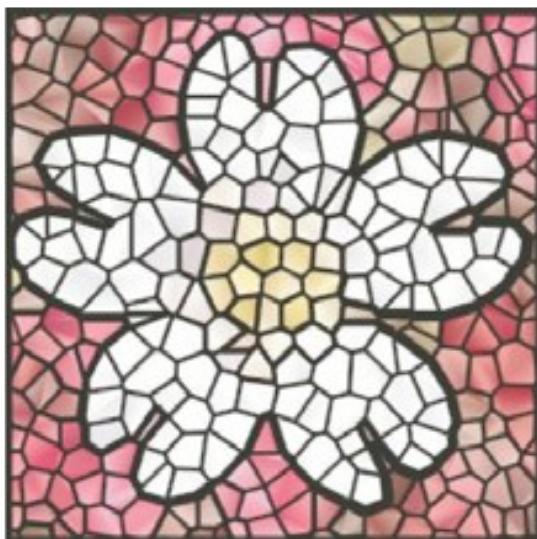
(c) 提案法の結果

図4.17 重み付き等方ボロノイ法との比較

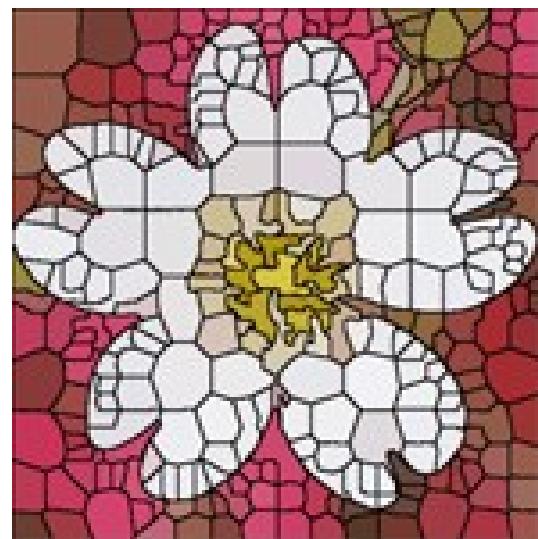
Fig.4.17 Comparisons with weighted Voronoi tessellations.



(a) 入力画像



(b) 芳賀らの結果



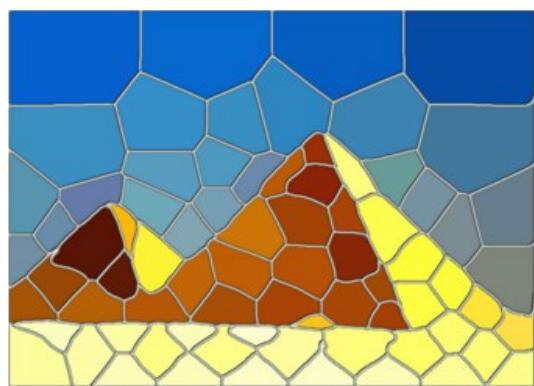
(c) 提案法の結果

図4.18 芳賀らの手法との比較

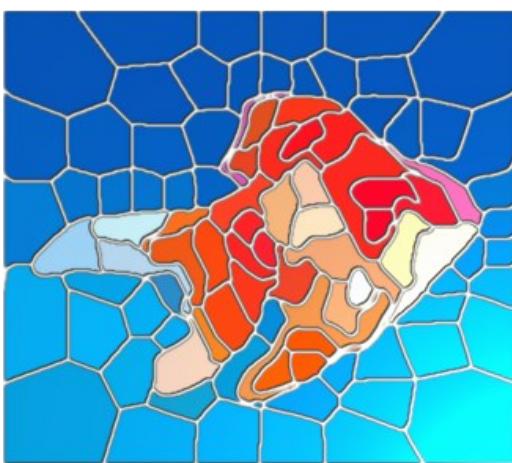
Fig.4.18 Comparison with Haga and Nishita.



(a) 図4.10(b)のステンドグラス画像



(b) 図4.11(c)のステンドグラス画像



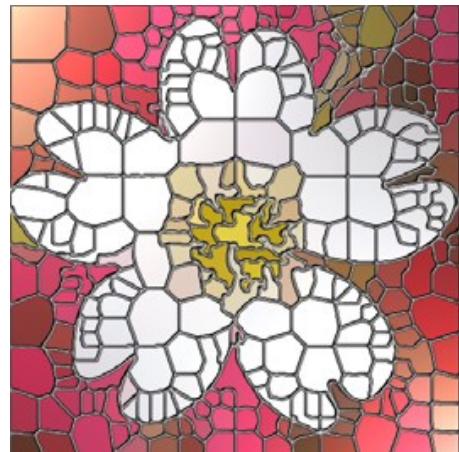
(c) 図4.12(c)のステンドグラス画像



(d) 図4.13(c)のステンドグラス画像



(e) 図4.17(c)のステンドグラス画像



(f) 図4.18(c)のステンドグラス画像

図4.19 ステンドグラス画像

Fig.4.19 Stained glass images.

4.6まとめ

本章では、入力画像を4分木分割して母点を配置する非等方ボ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。

第 5 章

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

5.1 はじめに

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5.1のようにラフスケッチの線画から作られることもある[42][43]。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。図5.1(b), (d)では図5.1(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5.2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5.2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5.3に示すDi Blasiら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。



(a) スケッチ

(b) ステンドグラス



(c) スケッチ

(d) ステンドグラス

図5.1 ラフスケッチ線画からのステンドグラス生成例

Fig.5.1 Examples of stained glass produced by rough sketch line drawings.

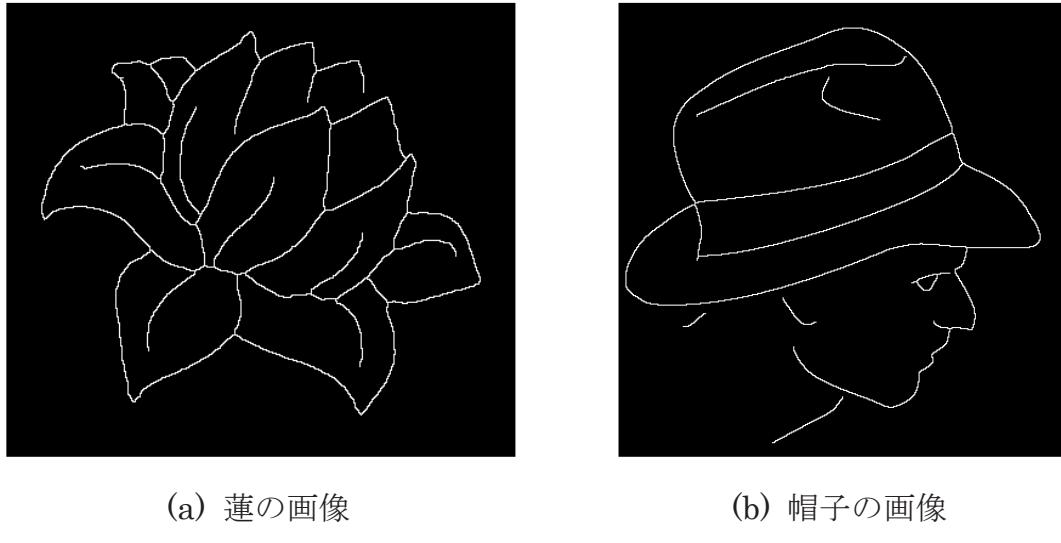


図5.2 線画の例

Fig.5.2 Examples of line drawings.

他の方法として、王ら[31][32]の非等方ボロノイ分割を応用することが考えられる。しかし、この非等方ボ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5.1や図5.2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ボロノイ法を用い、ボ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ボ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。

ボロノイ図に線画を埋め込む類似手法としてMouldの手法が提案されている

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。

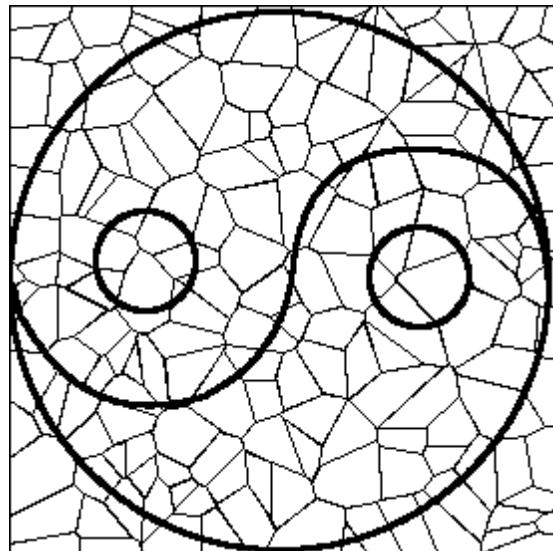


図5.3 Di Blasiらのモザイクタイル分割

Fig.5.3 Mosaic tile tessellation by Di Blasi et al.

5.2 ボ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ボロノイ分割する.

の2段階からなる. このとき, 入力線画の線がボ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5.4(a)の線画の距離変換を図5.4(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.



(a) 入力線画



(b) 距離変換画像

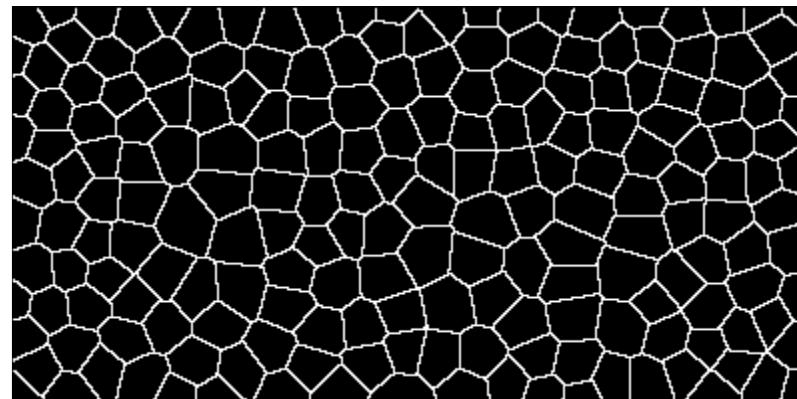
図5.4 入力線画の距離変換

Fig.5.4 Distance transform of input line drawing.

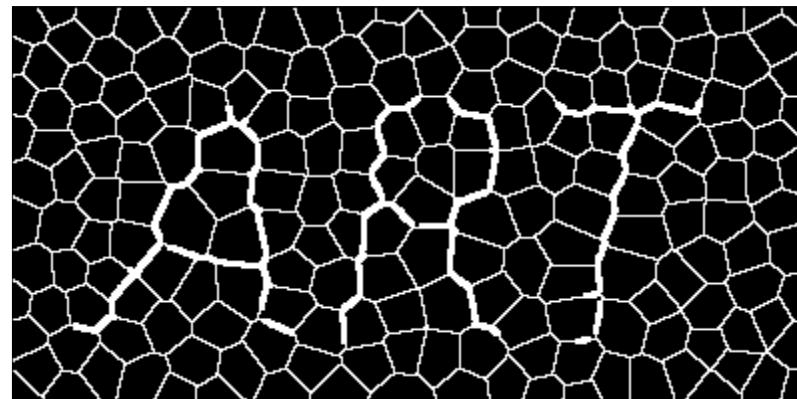
図5.4(a)の線画について、このPDSで打った点を母点とするボロノイ分割を図5.5(a)に示す。 $r = 17$, $d_m = 15$ とした。このままでは図5.4(a)の線がわかり難いので、Mouldと同様に、入力線画の線から距離 r 以内の最近傍のセル境界線を太くしたのが図5.5(b)である。 $r = 5$ とした。図5.3のDi Blasiらと違い、図5.5(b)

では太い線もボ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、ボロノイ分割を非等方にし、重みを付ける。



(a) 等方ボロノイ分割



(b) 太いラインを付けた結果

図5.5 等方ボロノイ分割

Fig.5.5 Isotropic Voronoi tessellation.

5.2.1 非等方ボロノイ分割

セルの形状を入力線に沿って歪ませると、セル境界も入力線に沿うと期待される。そこで、上記のボロノイ分割での画素*i*と母点*k*の距離

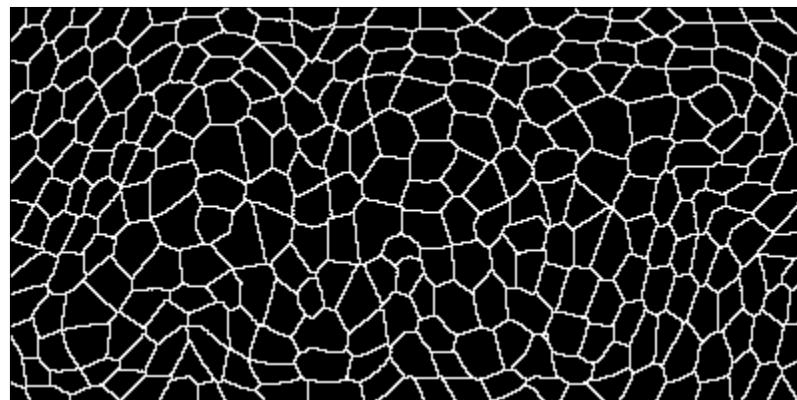
$$D_{ik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2} \quad (5.1)$$

をバイラテラル距離

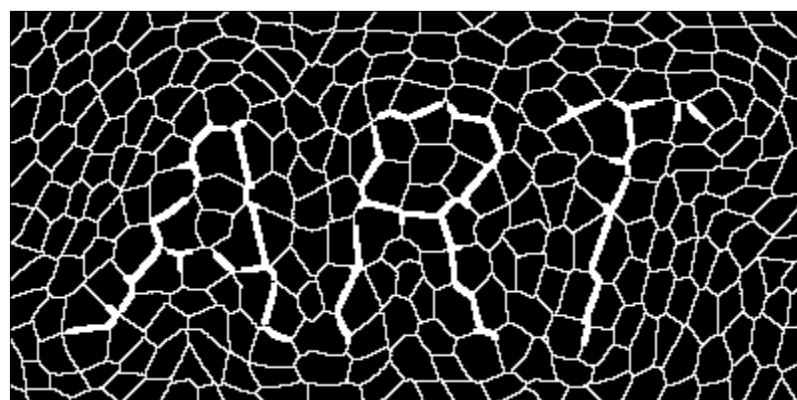
$$D_{bik} = \sqrt{(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2 + \alpha * (d_i - d_k)^2} \quad (5.2)$$

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ボロノイ分割が非等方になる。彼らの方法では 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による非等方ボロノイ分割を図5.6(a)に示す。 $\alpha = 0.4$ とした。図5.6(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5.6(b)との差は僅かである。



(a) 非等方ボロノイ分割



(b) 太いラインを付けた結果

図5.6 非等方ボロノイ分割

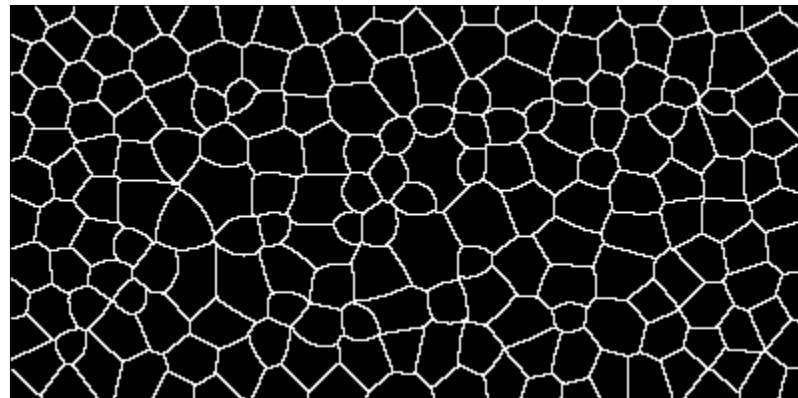
Fig.5.6 Anisotropic Voronoi tessellation.

5.2.2 重み付き等方ボロノイ分割

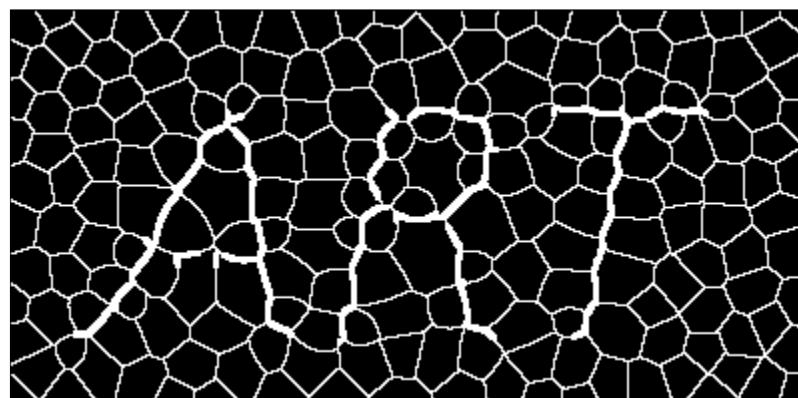
非等方化とは別の改善法は母点の重み付けである。図5.5のボロノイ分割ではすべての母点の重みは同じなので、隣接する母点の2等分線が境界になる。したがって、母点が入力線から等距離にないとセル境界が入力線からずれる。上記のPDSでは、点は入力線から距離 d_m 以内には打たれないが、正確に d_m だけ離れるわけではない。そこで、母点が等距離でなくともセル境界が入力線に一致するように、重みなし距離 D_{ik} を重み付き距離 $D_{wik} = D_{ik}/d_k$ に変える。こうすると母点からセル境界までの距離の比が母点の距離変換値の比になるので、入力線に一致すると期待される。この重み付き等方ボロノイ分割を図5.7に示す。図5.5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。

5.2.3 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5.8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。



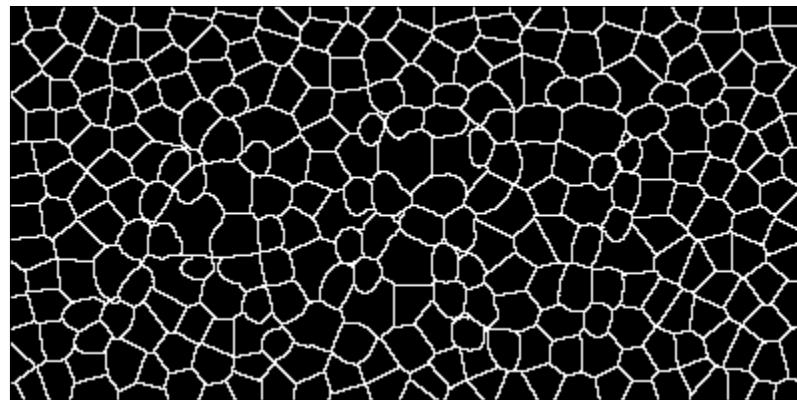
(a) 重み付き等方ボロノイ分割



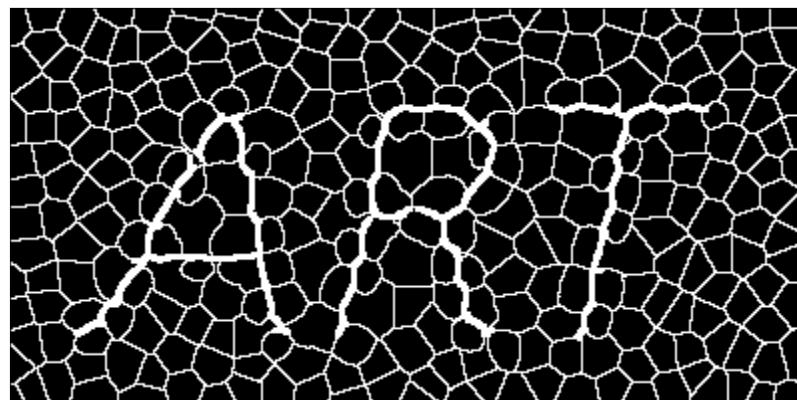
(b) 太いラインを付けた結果

図5.7 重み付き等方ボロノイ分割

Fig.5.7 Weighted isotropic Voronoi tessellation.



(a)重み付き非等方ボロノイ分割



(b) 太いラインを付けた結果

図5.8 重み付き非等方ボロノイ分割

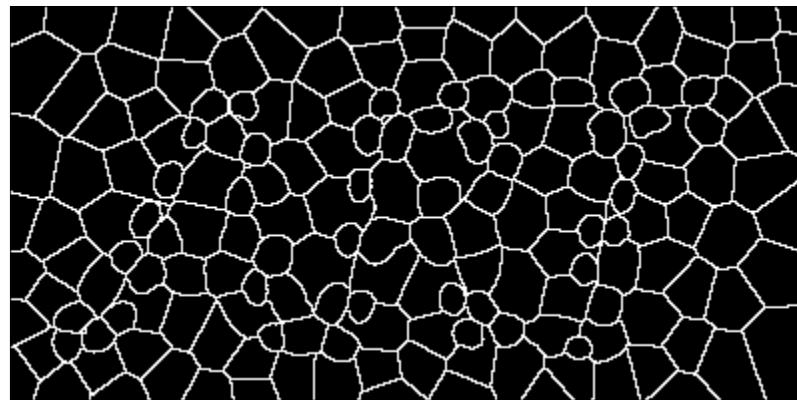
Fig.5.8 Weighted anisotropic Voronoi tessellation.

5.2.4 適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割

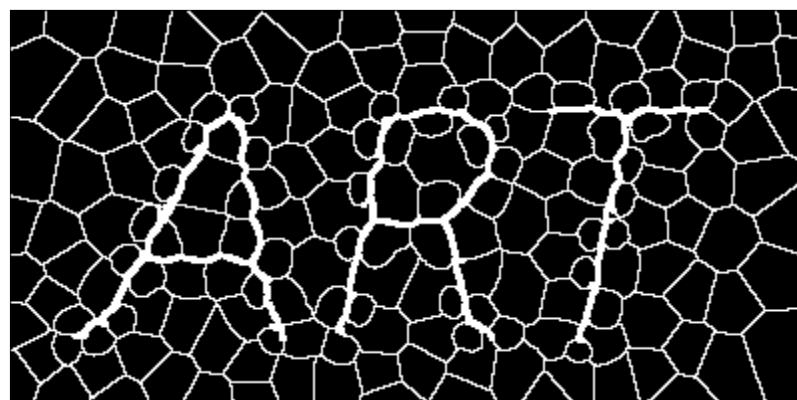
この重み付き非等方ボロノイ分割では、セルのサイズは画像全体で均一なので、入力線の遠方でもサイズが細かく、セルの数が不必要に多い。そこで、入力線から離れるにつれてセルサイズが大きくなるように、PDSでのディスク半径 r を $r = r_m + p * d_k$ に変える。この適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割(WAVT)を図5.9に示す。 $r_m = 15$, $p = 0.1$ とした。入力線の乱れも少なく、セルサイズも画像周辺で大きくなっている。

なお、王ら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5.10(b)は、図5.10(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(WAVT)である。図5.10(c)はMouldの結果画像である。図5.10(b)は図5.10(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ぼかしてコントラスト強調したのが図5.10(d)であり、太線化しなくとも埋め込まれた線画がある程度判別できるのが分かる。



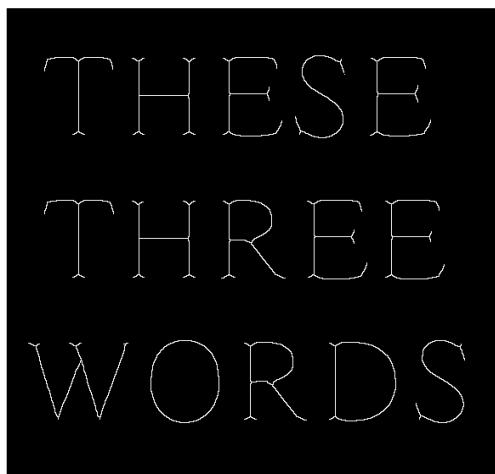
(a) 適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割



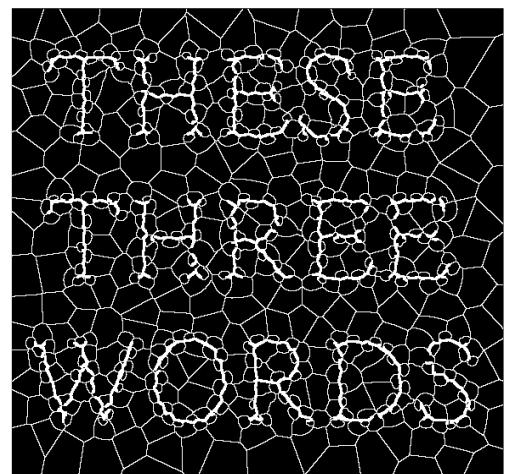
(b) 太いラインを付けた結果

図5.9 適応的セルサイズ重み付き非等方ボロノイ分割

Fig.5.9 Adaptive cell size Weighted anisotropic Voronoi tessellation.



(a) 入力線画



(b) 太いラインを付けたWAVT結果



(c) Mould



(d) ぼかしたWAVT結果

図5.10 Mouldの結果との比較

Fig.5.10 Comparison with result of Mould

5.3 他の入力画像例

図5.2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5.11に示す。また、他の線画の画像例での結果を図5.12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いる。無駄なセルが省かれている。しかし、入力の線の近くでは、ステンドグラスとしてはセルサイズが細かくなく過ぎている。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。

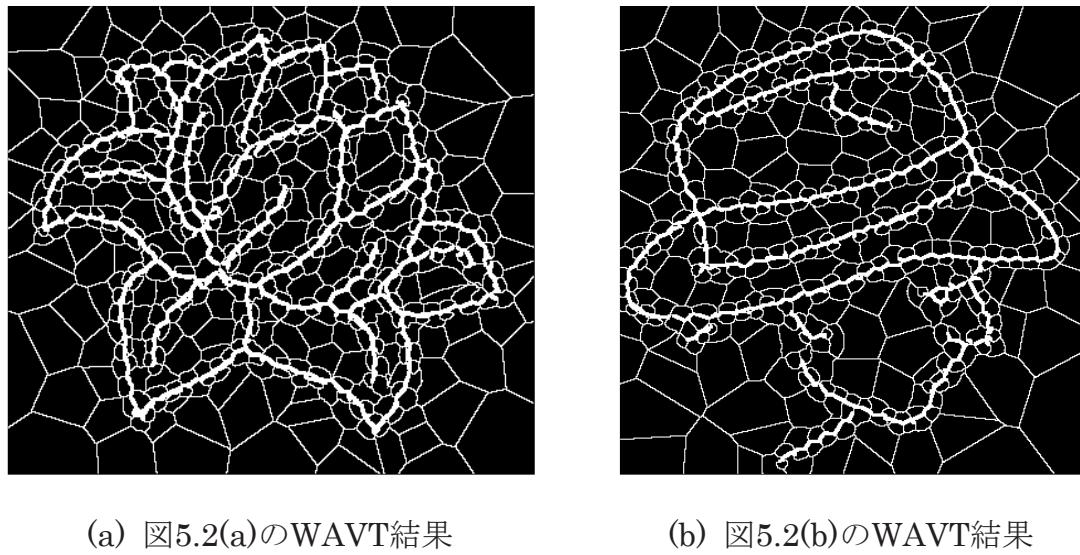
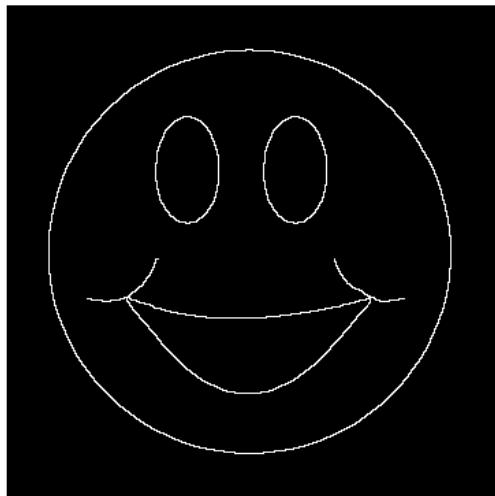


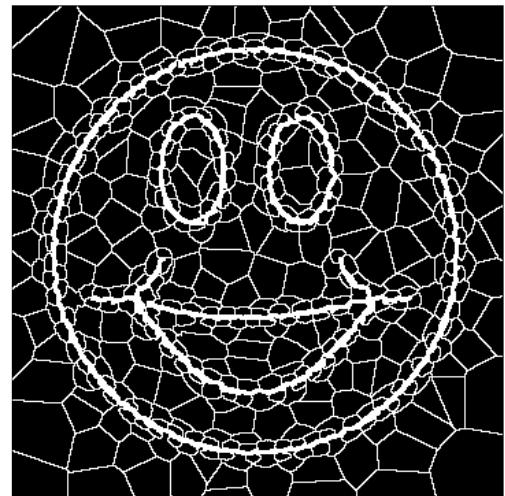
図5.11 図2のWAVT結果

Fig.5.11 Results for WAVT in Fig.5.2.

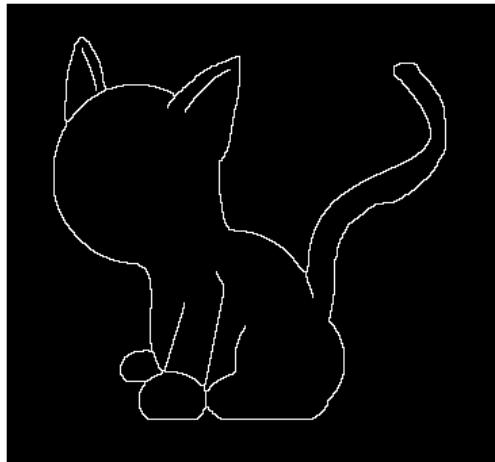
なお、図5.11(a)に鉛線の凹凸と照明効果を付け加えたステンドグラス風画像を図5.15に示す。図5.11(a)の結果を見ると、入力線画が変形しており、判別し難い。入力線画がわかりやすいように、図5.2の線を少し太くして図5.11(a)に重ね描きしたのを図5.15(b)に示す。また、ハスの花に色を付けた(輪郭線を補間して途切れを埋めてから彩色した)ものを図5.15(c)に示す(ただし、輪郭の途切れが大きい場合にはこのような彩色は難しいと思われる)。このような後処理を付け加えれば入力線画がわかりやすくなるが、図5.15に見られる線の変形の主原因は、入力の線の近くに細かいセルが多数生成されることであり、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。



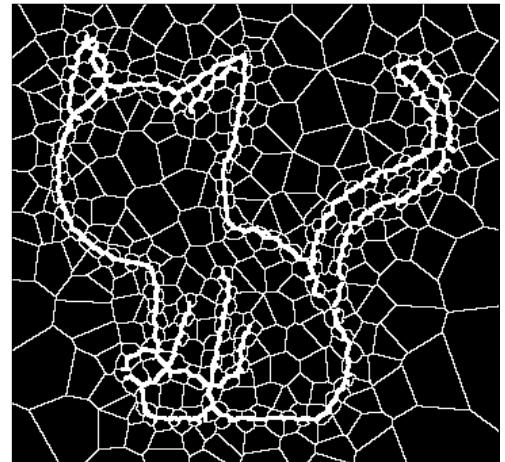
(a) 入力線画



(b) WAVT結果



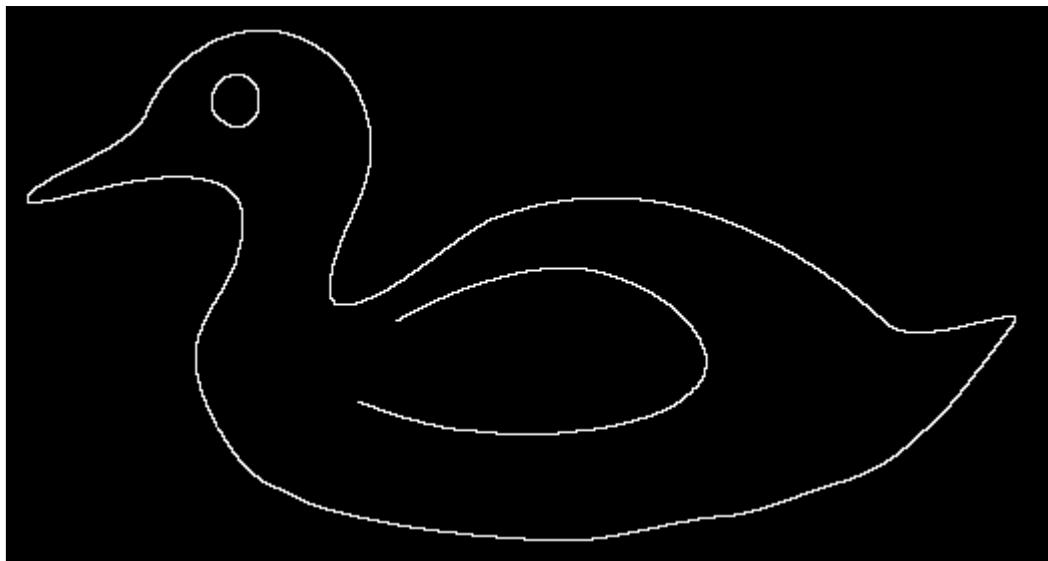
(c) 入力線画



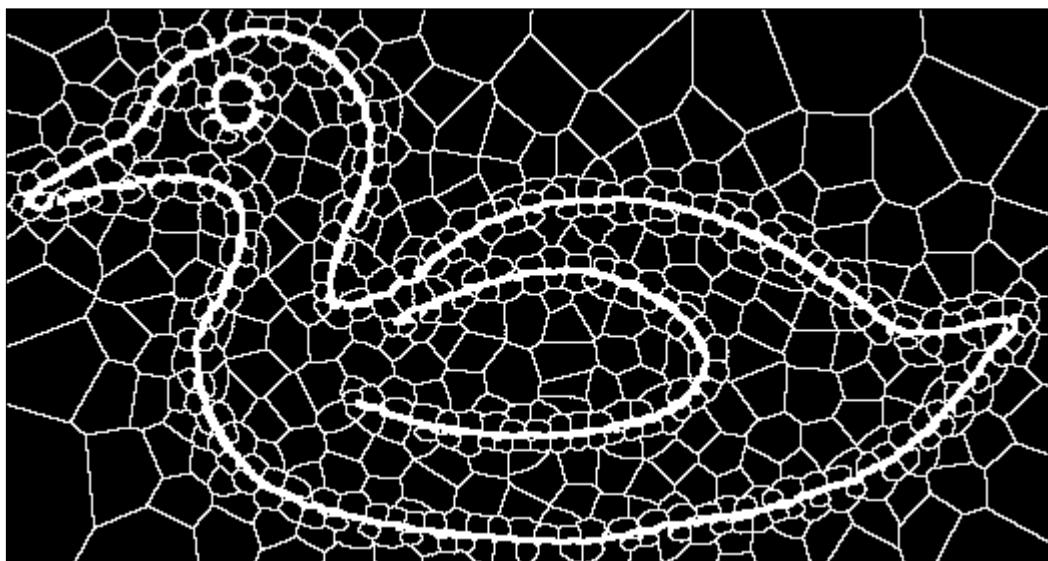
(d) WAVT結果

図5.12 他のWAVT結果例1

Fig.5.12 Other WAVT example 1.



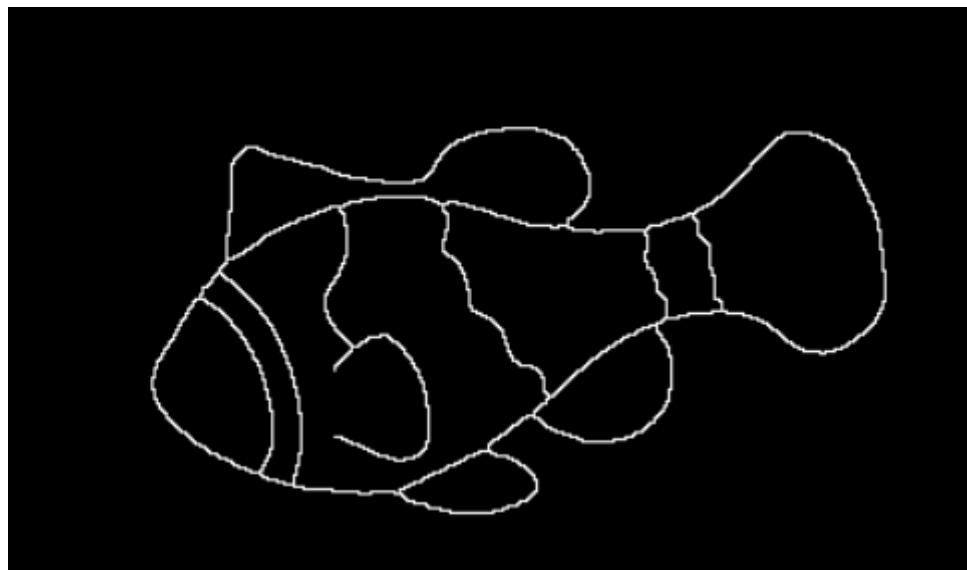
(a) 入力線画



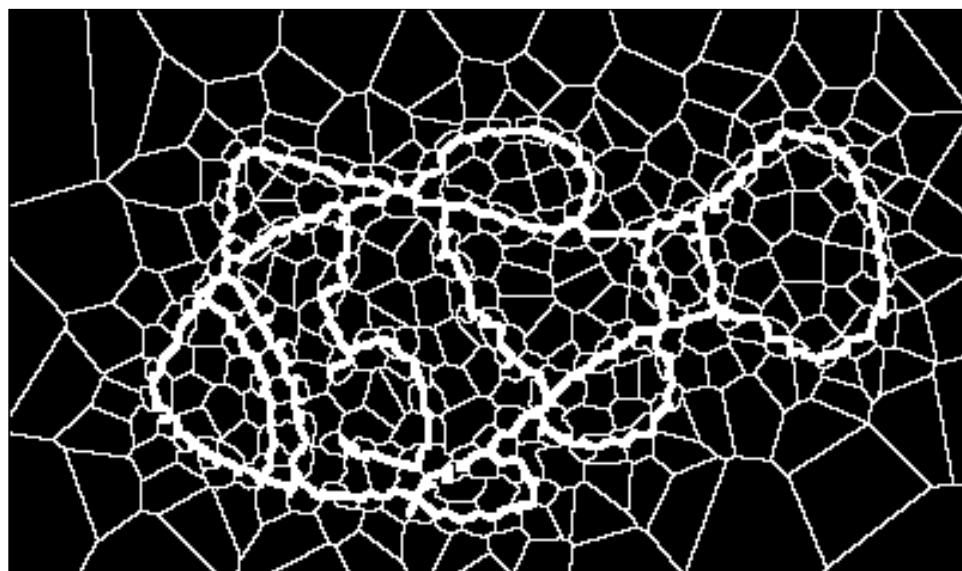
(b) WAVT結果

図5.13 他のWAVT結果例2

Fig.5.13 Other WAVT example 2.



(a) 入力線画



(b) WAVT結果

図5.14 他のWAVT結果例2

Fig.5.14 Other WAVT example 3.

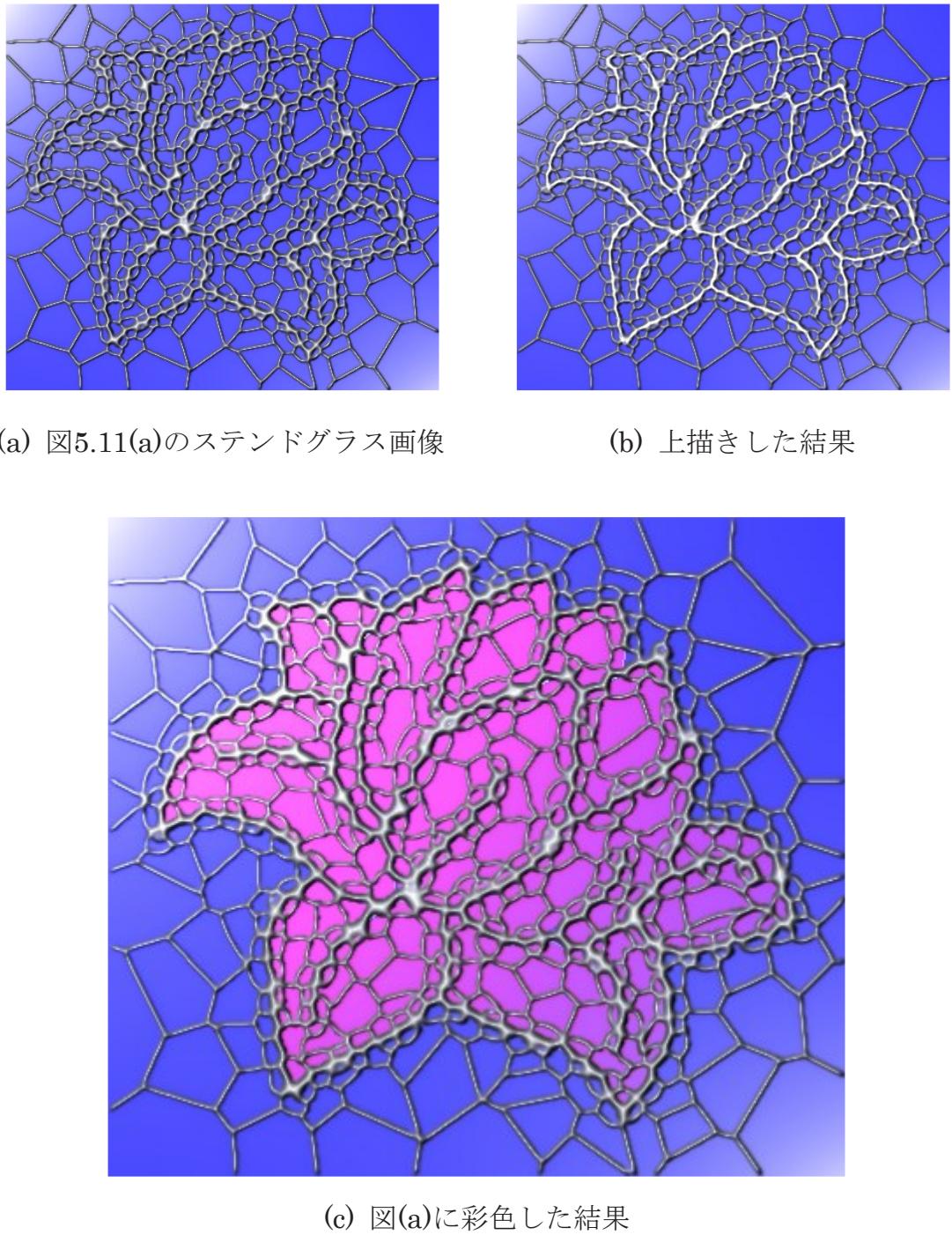


図5.15 図5.11(a)のステンドグラスに線を上書きした結果

Fig.5.15 Results of stained glass and overlaying lines in Fig 5.11(a).

5.4まとめ

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。本提案法の結果を見ると、部分的に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、線を太くして上書きするなどの後処理を付け加えれば入力線画がわかりやすくなるが、線の変形の主原因は、入力の線の近くに細かいセ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所以、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。

第6章

結論

6.1まとめ

本論文では、画像中に母点を配置し、バイラテラル距離による非等方ボロノイ図を作成する手法を提案し、種々のノンフォトリアリストイックレンタリング(NPR)に応用した。いずれのNPRにおいても、画素値順PDSとバイラテラル距離による非等方ボロノイ分割の有効性が認められた。普通のPDSよりも、画素値順PDSのほうが青色雜音性が高く、エッジの保存性も高い。また、点描画を濃淡画像に戻す逆変換処理も示した。このように本論文では、物体のエッジや輪郭などの特徴に応じて適応的な形状を持つ点描画を生成する手法を提案し、その手法によって等方円よりも非等方円のほうがエッジや輪郭の保存性が向上し、画像構造の表現性が高いことを示した。

また、ステンドグラス画像を生成するために、入力画像を4分木分割して母点を配置する非等方ボ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。非等方ボロノイ分割を使って、エッジに合う曲線を生成し、各物体の形状に柔軟に対応することができ、曲線を含むことによって視覚的な印象も向上した。最後に、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、ラフスケッチの線画からステンドグラス風画像を作ることができることを示した。

6.2 今後の課題

本研究の今後の課題として、提案した様々なノンフォトリアリスティックレンダリング手法を改良し、従来法と比べて、より視覚的印象を向上することがあげられる。以下に、本研究で提案したノンフォトリアリスティックレンダリング手法のそれぞれにおける課題点を述べる。

1. 点描画に関して、逆点描変換で生じるボロノイセルの濃淡むらの改善法が今後の課題である。また、非等方PDSによる適応的な形を持つ点描画では、実験した入力画像はすべて単色な構成の画像であるが、今後の研究課題は

- (1) 灰色の背景に白と黒い点を打つ点描画
- (2) 白い背景にカラーの点を打つ点描画

など、点の属性を増やした点描画への応用である。

2. ステンドグラス風画像に関して、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を今後、検討したい。また、本提案法では複雑な形状のセルが発生があるので、パラメータ α の値を場所で変えてセル形状の単純性を向上させるのが今後の課題として挙げられる。

謝辞

本研究の遂行および本論文をまとめるにあたり、終始多くのご指導を賜りました九州大学大学院芸術工学研究院の浦濱喜一教授に深く感謝いたします。

また、九州大学大学院芸術工学研究院の坂本博康教授、小野直樹准教授、原健二准教授および井上光平助教からは貴重なご教示をいただきまして、心から感謝申し上げます。

最後に、日頃の研究生活を支えて下さいました浦濱研究室の先輩、同期、後輩の皆様、研究の相談や支援に応じて下さいまして深く感謝いたします。

参考文献

- [1]. Thomas Strothotte, Stefan Schlechtweg, “Non-Photorealistic Computer Graphics : Modeling, Rendering and Animation”, Morgan Kaufmann Publisher.
- [2]. ヘンリー・ジョハン, 松井一, 芳賀俊之, 土橋宜典, 西田友是, “領域ベース・ストロークベースのアート風画像生成法”, 信学論, J88-D2, 2, pp. 358-367, 2005.
- [3]. Adobe Systems. Adobe Photoshop.
- [4]. A. Secord, “Weighted Voronoi stippling”, Proc.NPAR, pp. 37-43, 2002.
- [5]. D. Mould, “A stained glass image filter”, Proc Rend. Tech., pp. 20-25, 2003.
- [6]. 杉田純一, 高橋時市郎, “視覚混合と補色対比を考慮した点描画風画像生成法”, FIT2007(第6回情報科学技術フォーラム)講演論文集, I-082 (2007).
- [7]. 傅曉宇, 王濤, 井上光平, 原健二, 浦浜喜一, “カラーライン量子化による点描風画像の生成”, VCシンポジウム, 2012. 06.
- [8]. L. Feng, I. Hotz, B. Hamann and K. I. Joy, “Anisotropic noise samples”,

- IEEE Trans. Vis. Comput. Graph., vol. 14, no. 2, pp. 342-354, 2008.
- [9]. S. Hiller, H. Hellwig and O. Deussen, “Beyond stippling - methods for distributing objects on the plane”, Comput. Graph. Forum, vol. 22, no. 3, pp. 515-522, 2003.
- [10]. 芳賀俊之, 西田友是, “ボロノイ図を用いた画像のステンドグラス化手法”, 情処学グラフィクスと CAD 研報, 104-4, pp. 13-16, 2001.
- [11]. 辻本陽子, 井上光平, 浦浜喜一, “乗法的重み付きボ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.
- [12]. Ian Simpson (1987), “The Encyclopedia of Drawing Techniques”, London : Headline. pp. 62–64. ISBN 0-7472-0051-3.
- [13]. Campbell, Alastair, “The Designer's Lexicon”, 2000 Chronicle, San Francisco.
- [14]. McCue, Claudia, “Real World Print Production”, 2007, Peachpit Berkeley.
- [15]. Hutton, John G. (2004), “Neo-impressionism and the Search for Solid Ground : Art, Science, and Anarchism in Fin-de-siecle France”, Baton Rouge, Louisiana :Louisiana State University Press. ISBN 0-8071-1823-0.
- [16]. 井上光平, 坊野直人, 浦浜喜一, “点再配置法に基づく点描画のモーフィング”, 信学論, J86-A, 9, PP. 983-984, 2003.
- [17]. A. Secord, “Weighted Voronoi stippling”, Proc.NPAR, pp. 37-43, 2002.
- [18]. R. L. Cook, “Stochastic sampling in computer graphics”, ACM Trans.

- Graph., 5, 1, pp51-72, 1986.
- [19]. 胡忠英, 浦浜喜一, “非等方ボロノイ分割による点描画から階調画像への変換”, 信学論, J95-D, 7, 2012.
- [20]. A. Secord, W. Heidrich, and L. Streit, “Fast primitive distribution for illustration”, Proc. 13th Eurographics Rendering Workshop, pp. 215-226, Pisa, Italy, June 26-28, 2002.
- [21]. Hiller S, Deussen O, Keller A, “Tiled blue noise samples[J]”, 2001.
- [22]. T. Houit and F. Nielsen, “Video stippling”, Proc. ACIVS, pp. 384-395, 2002.
- [23]. L. Feng, I. Hotz, B. Hamann and K. I. Joy, “Anisotropic noise samples”, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph, vol. 14, no. 2, pp. 342-354, 2008.
- [24]. S. Hiller, H. Hellwig and O. Deussen, “Beyond stippling -methods for distributing objects on the plane”, Comput. Graph Forum, vol.22, no.3, pp. 515-522, 2003.
- [25]. Z. Hu, K. Inoue, K. Hara, N. Ono, K. Urahama, “Anisotropic stippling images with bilateral Poisson disk sampling”, MIRU, IS3-22, 2011.
- [26]. H. Li and D. Mould, “Contrast-aware halftoning”, Comput. Graph. Forum, vol.29, no. 2, pp. 273-280, 2010.
- [27]. H. Li and D. Mould, “Structure-preserving stippling by priority based error-diffusion”, Proc. GI, pp. 127-134, 2011.
- [28]. 井上光平, 浦浜喜一, “点再配置法に基づく点サイズ可変な点描画”, 信学論 (A), vol. J86-A, no. 11, pp. 1251-1253, Nov. 2003.
- [29]. 牧野大輔, 井上光平, 原健二, 浦浜喜一, “紙の厚みとテクスチャを考

- 慮した貼り絵風画像の生成”, 映情学誌, vol. 60, no. 12, pp. 2038–2041, 2006.
- [30]. 胡忠英, 浦浜喜一, “バイラテラル距離に基づく非等方TSP アート”, 信学論 (D), vol. J94-D, no. 4, pp. 746–749, April 2011.
- [31]. 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 vol. J94-A, no. 2 pp. 149-152, 2011.
- [32]. 王富会, 王濤, 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”, 映情学誌, vol. 65, no. 7, pp. 1000-1002, 2011.
- [33]. S. Seo, H. Lee, H.Nah and K.Yoon, “Stained glass rendering with smooth tile boundary”, Proc. ICCS, pp162-165, 2007.
- [34]. S. Brooks, “Image-Based Stained Glass”, IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, Vol. 12, No. 6, pp. 1547-1558, November/December 2006.
- [35]. D. Ashlock, B. Karthikeyan, and K. M. Bryden, “Non-Photorealistic Rendering of Images as Evolutionary Stained Glass”, IEEE Congress on Evolutionary Computation Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada, pp. 2087-2094, 2006.
- [36]. V. Setlur and S. Wilkinson, “Automatic Stained Glass Rendering”, roceedings of CGI, LNCS 4035, pp. 682-691, 2006.
- [37]. G. M. Faustino and L. H. De Figueiredo, “Simple Adaptive Mosaic effects”, Proceedings of SIBGRAPI2005, pp. 315-322, August 2005.
- [38]. S. Green, D. Salesin, S. Schofield, A. Hertzmann, P. Litwindowicz, A. A. Gooch, C. Curtis, B. Cooch, “Non-Photorealistic Rendering”, Course Note #17 of SIGGRAPH’99, 1999.
- [39]. K. Miyata, T. Itoh, K. Shimada, “Organic Texture with Controlled

- Anisotropy and Directionality”, SIGGRAPH 2001, Technical Sketch, 2001, pp. 240.
- [40]. K. E. Hoff III, T. Culver, J. Keyser, M. Lin, D. Manocha, “Fast Computation of Generalized Voronoi Diagrams Using Graphics Hardware”, Proc. SIGGRAPH’99. 1999, pp. 277-286.
- [41]. G. Di Blasi, G. Gallo and M. Petralia, “Puzzle image mosaic”, Proc, IASTED/VIIP(2005).
- [42]. <http://www.beastwithin.org/users/wwwolf/blog/2012/03/stained-glass-in-gimp-and-inkscape.html>.
- [43]. <http://www.saltmanz.com/pictures/Artwork/Chris/Digital%20Art/Stained-Glass+Flowers+-+pencil+sketch.jpg.php>.
- [44]. J. Sugita and T. Takahashi, “A method for generating colored-paper mosaic images based on hierarchical Poisson disk sampling”, J. IIEE, vol. 36, no. 4, pp. 407-416, 2007.
- [45]. SEO S. H, “The new area subdivision methods for producing shapes of colored paper mosaic”, Proc. ICCS'02, 2002.
- [46]. A. Hertzmann, “A survey of stroke-based rendering”, IEEE Comput. Graph. Appl., vol.23, no. 4, pp. 70-81, 2003.
- [47]. 井上光平, 浦浜喜一, “カラー楕円板近似に基づく貼り絵風画像の生成”, 電子情報通信学会論文誌. A, J88-A(11), 1376-1380, 2005-11-01.
- [48]. A. Lagae and P. Dutre, “A comparison of methods for generating Poisson disk distributions”, Comput. Graph. Forum, vol. 27, no.1, pp. 114-129, 2008.
- [49]. J. Lopez-Moreno, J. Jimenez, S.Hadap, E.Reinhard, K. Anjyo and D. Gutierrez, “Stylized depiction of images based on depth perception”,

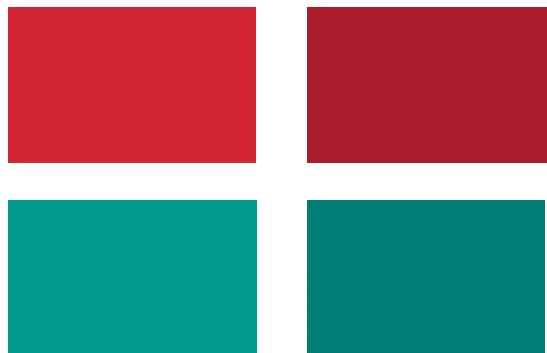
- Proc.NPAR, pp. 109-118, 2010.
- [50]. E. A. Khan, E. Reinhard, R. W. Fleming, and H. H. Bulthoff, “Image-based material editing”, ACM Trans.Graph., vol. 25, no. 3, pp. 654-663, 2006.
- [51]. SECORD A, “Fast primitive distribution for illustration”, Proc. 13th Eurographics Rendering Workshop, 2002, 215-226, 2002.
- [52]. 井上光平, 浦浜喜一, “非交差線分によるハーフトーニング”, 映像情報メディア学会誌, 映像情報メディア64(9), 1379-1381, 2010-09-01.
- [53]. HU Z, “Anisotropic super-ellipsoidal stippling with bilateral L_p distance”, Proc. CJKPR, 2010, 84-89, 2010.
- [54]. 胡忠英, 浦浜喜一, “非等方重心ボロノイ分割による非写実的ハーフトーニング”, 電子情報通信学会論文誌, J95-D, 4, 1061-1064, 2012. 04.
- [55]. C. Tomasi and R. Manduchi, “Bilateral filtering for gray and color images”, Proc. ICCV, pp. 839-846, 1998.
- [56]. Youngsup Park, Sanghyun Seo, YongJae Gi, Hanna Song, and Kyunghyun Yoon, “Rendering Technique for Colored Paper Mosaic”, ICCS 2007, Part II, LNCS 4488, pp. 114-121, 2007.
- [57]. H. Li, L. Y. Wei, P. V. Sander and C. W. Fu, “Anisotropic Poisson disk sampling”, HKUST Tech. Report, HKUST-CS09-02, 2009.
- [58]. L. Feng, I. Hotz, B. Hamann and K. I. Joy, “Anisotropic noise samples”, IEEE Trans. Vis. Comput. Graph. 14, 2, pp. 342-354, 2008.
- [59]. 胡忠英, 浦浜喜一, “バイラテラル L_p 距離に基づく非等方ストローク生成の簡便法”, 信学論(A), vol. J94-A, no. 3, pp. 226-229, March 2011.

- [60]. R. L. Cook, “Stochastic sampling in computer graphics”, ACM Trans. Graph, 5, 1, pp. 51-72, 1986.
- [61]. D.Mould, “Image-guided fracture”, Proc. Graphics Interface, pp. 219-226, 2005.
- [62]. H. Yamada, “Complete Euclidean distance transformation by parallel operation”, Proc. of 7th Int. Conf. on Pattern Recognition, vol, pp. 69-71, 1984.
- [63]. A. Girgensohn and P. Chiu, “Stained glass photo collages”, UIST 2004 Companion, pp13-14, 2004.

付録

付録A CIELAB色空間

$L^*a^*b^*$ 表色系は、均等色空間:UCS(Uniform Color Space)の代表的なものである。均等色空間とは、等しい大きさに知覚される色差が、空間内で等しい距離に対応するように作成された色空間である。CIE(国際照明委員会)が1976年に推奨した色空間で、 $L^*a^*b^*$ 表色系と呼ばれ、CIELABと略記される。



図A.1 色差の例

Fig.A.1 Example of Color difference.

たとえば、上の図A.1に、赤2色の色違いの度合いと、緑2色の色違いの度合いが、心理的に同じに見える時には、その2色間の距離を同じにするという考え方のもとに開発された色座標である。色の並びが均等にできている、ということです、均等色空間(UCS)と呼ばれる。この色座標システムの利点は、色違い(色差)

が均等に測れる点である。

RGBやCMYK等とは異なり， $L^*a^*b^*$ 表色系は人間の視覚を近似するよう設計されている。 L^* は明度を表し， a^* と b^* が色相と彩度を決める。 a^* ， b^* は色の方向を示している。図A.2に示すように， a^* は赤方向， $-a^*$ は緑方向， b^* は黄方向， $-b^*$ は青方向を示している。数値が大きくなるに従って色が鮮やかになり，中心になるに従ってくすんだ色になる。また， $L^*a^*b^*$ 表色系は知覚的均等性を重視しており， L^* は人間の明度の知覚と極めて近い。

$L^*a^*b^*$ 表色系は，XYZ表色系からの変換式が作られている。また，マンセル表色系は，XYZへの変換表が与えられているので，それによって，マンセル－XYZ－ $L^*a^*b^*$ への変換が可能になる。

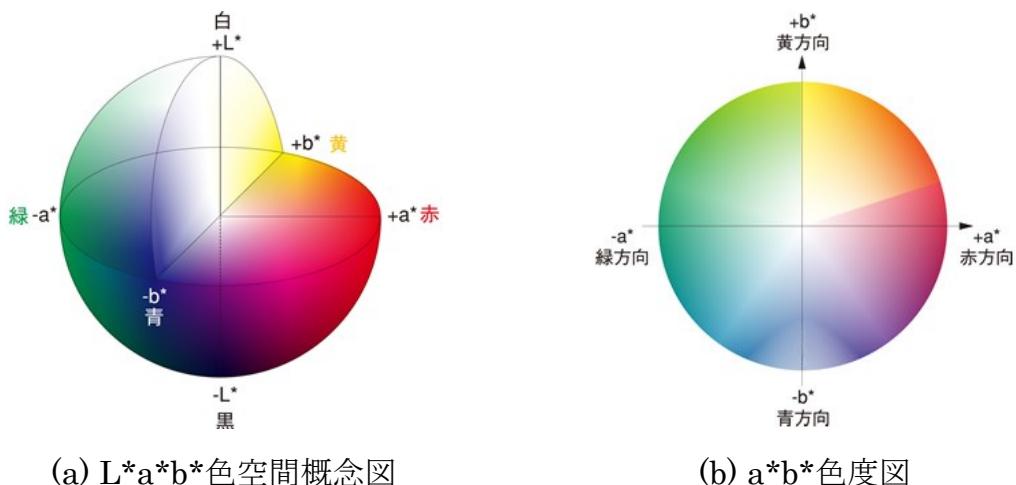


図 A.2 $L^*a^*b^*$ 表色系の色度図

Fig.A.2 $L^*a^*b^*$ color diagram.

付録 B ユークリッド距離による等方ボロノイ図と 2 次形式距離による非等方ボロノイ図およびバイラテラル距離による非等方ボロノイ図の比較

ここでは、本論文で紹介する等方ボロノイ図と非等方ボロノイ図について述べる。ボロノイ図(Voronoi diagram)とは、ある距離空間上の任意の位置に配置された複数個の点(母点)に対して、同一距離空間上の他の点がどの母点に近いかによって領域分けされた図のことである。距離空間内の有限の母点の集合 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ について、 $d(p, p_i)$ が任意の点 p と母点 p_i の距離とする。距離 d に対して、

$$V(p_i) = \{p | d(p, p_i) \leq d(p, p_j), i \neq j, j = 1, 2, \dots, n\}$$

で構成された領域を母点 p_i のボロノイ領域とよぶ。

具体的には、2 次元ユークリッド平面の場合、距離の式は

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$$

である。 x, y は各画素の x 座標と y 座標であり、 x_i, y_i は母点 i の x 座標と y 座標である。これで領域の境界線は、各々の母点の 2 等分線の一部になる。この分割を等方ボロノイ分割、分割された領域をボロノイ領域、領域の境界線を等方ボロノイ境界線とよぶ。

バイラテラル距離による非等方ボロノイ図について、バイラテラル距離の式を

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + \alpha * (d - d_i)^2}$$

とする。 x, y は各画素の x 座標と y 座標であり、 x_i, y_i は母点*i*の x 座標と y 座標である。 d_i, d_j はぼかした入力画像の画素値である。人間の視覚と近くするために、入力画像の画素値を CIELAB 座標の値 $[l *, a *, b *]^T$ とする。すなわち $(d - d_i)^2 = (l * - l *_i)^2 + (a * - a *_i)^2 + (b * - b *_i)^2$ とする。

2 次形式距離による非等方ボロノイ図については、画素の勾配ベクトルを考え、バイラテラル距離の式を 2 次形式距離で近似すると

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + \alpha * \left(g_{xi}(x - x_i) + g_{yi}(y - y_i) \right)^2}$$

となる。バイラテラル距離による非等方ボロノイ図を描く手法と同じように入力画像をぼかし、ぼかした入力画像の画素値を $[l *, a *, b *]^T$ とする。そして $[l *, a *, b *]^T$ の各ベクトルにソーベルフィルタをかけて勾配ベクトルを求める。

$$\begin{aligned} \text{つまり, } & \left(g_{xi}(x - x_i) + g_{yi}(y - y_i) \right)^2 = \left(g_{xi}^{l*}(x - x_i) + g_{yi}^{l*}(y - y_i) \right)^2 + \\ & \left(g_{xi}^{a*}(x - x_i) + g_{yi}^{a*}(y - y_i) \right)^2 + \left(g_{xi}^{b*}(x - x_i) + g_{yi}^{b*}(y - y_i) \right)^2 \text{ である。} \end{aligned}$$

一つの画像例での実験結果を以下の図に示す。バイラテラル距離と 2 次形式距離では、同じ α の値を使っている(以下の実験ではすべて、同じ α の値を使う)。図 B.1(a)は入力画像(720*516)である。エッジの付近で非等方性が過剰に強くなりすぎるので、勾配の変化を緩めるために、入力画像を Paint Shop のガウスぼ

かし(半径 20)でぼかす。ぼかした画像の結果は図 B.1(b)である。4 分木分割によって母点を配置し、母点の結果を図 B.1(c)に示す。

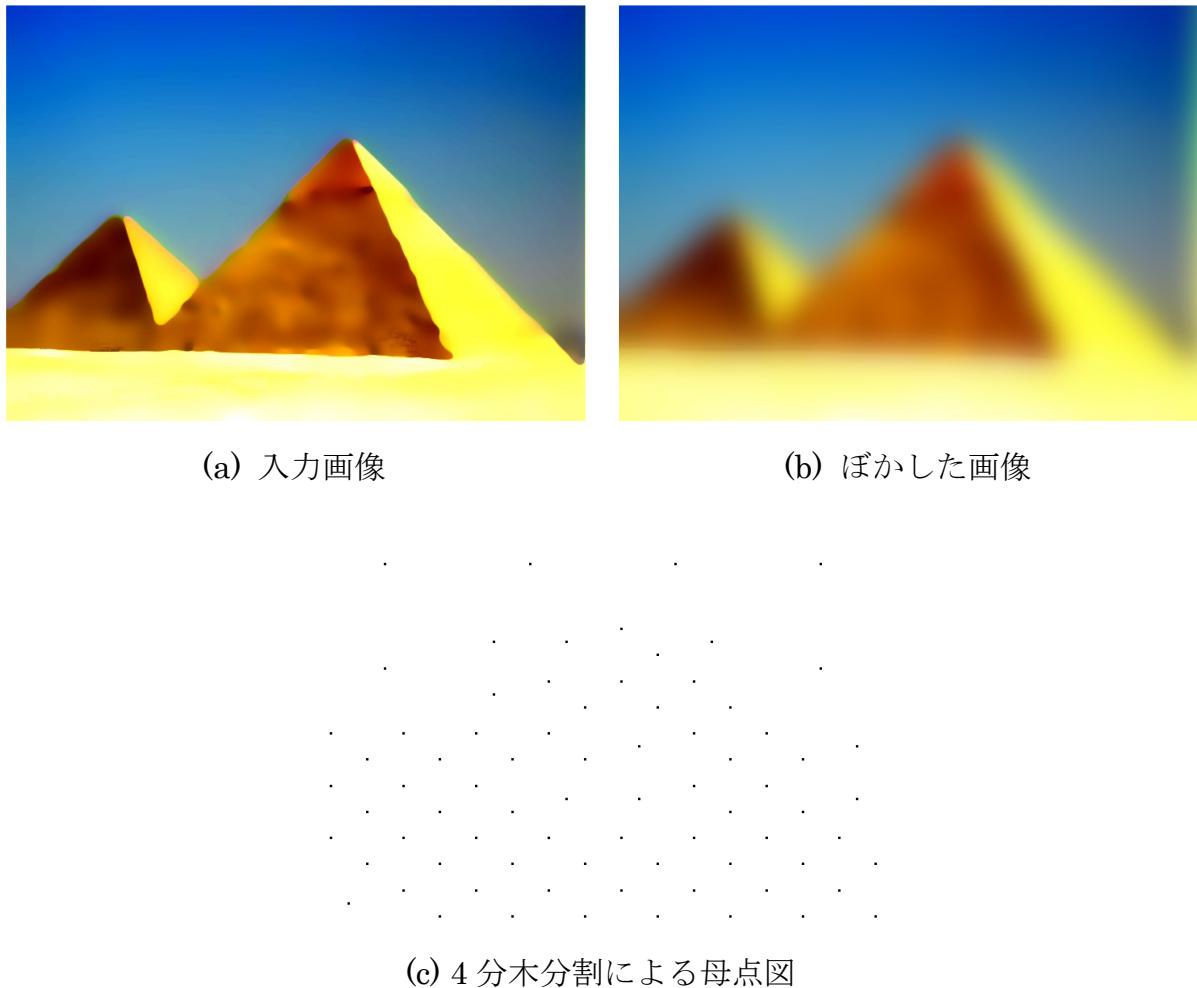
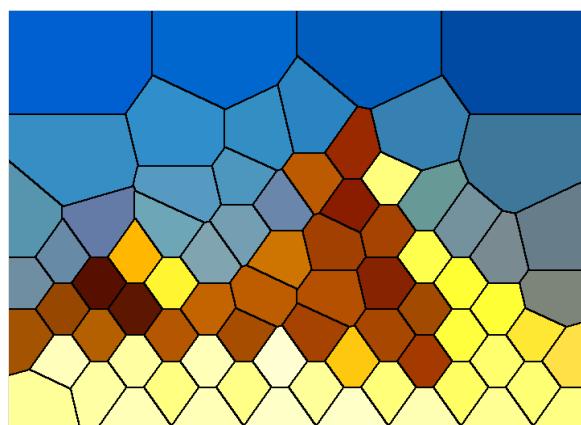


図 B.1 実験例 1

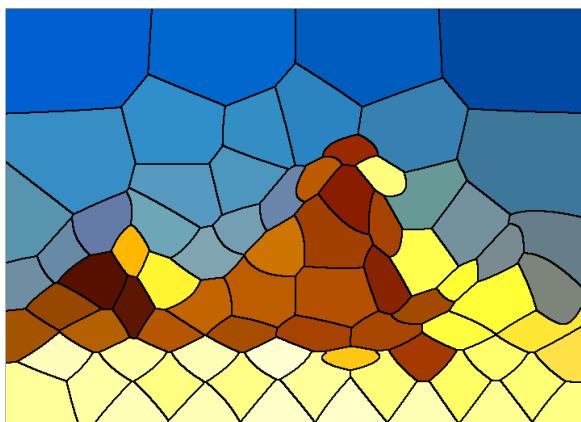
Fig.B.1 Example 1.

図 B.2(a)は、ユークリッド距離による等方ボロノイ図である。色の影響を考えず、ユークリッド距離だけで等方ボロノイセルを生成するので、すべての境界線は直線となる。それで、入力画像に曲線のエッジなどを再現することが難しい。2 次形式距離によって非等方ボロノイ図を生成し、微小セルを除去した結

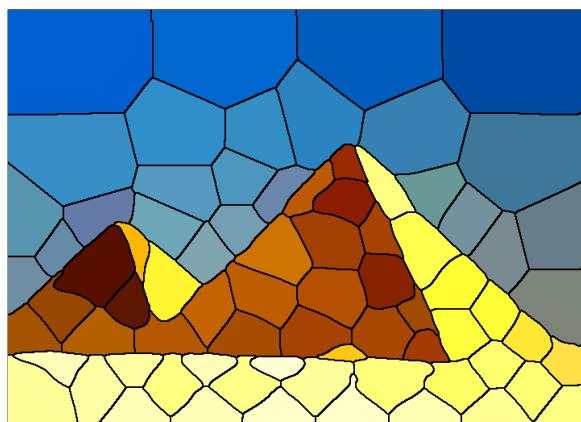
果を図 B.2(b)に示す($\alpha=2$). 各画素の色の勾配ベクトルを考えてセルを生成するので, 等方ボロノイ図より境界線が柔らかくなる. しかし, 2次形式距離は色の近似変化を表現することしかないので, 入力画像の色の変化が激しいところでは, セルの形は橢円になり, 物体を表現することが困難である. バイラテラル距離による非等方ボロノイ図の結果は図 B.2(c)である($\alpha=2$). 結果からみると, ユークリッド距離による等方ボロノイ図と 2次形式距離による非等方ボロノイ図より, エッジの保存性が高いし, 入力画像の各詳細部分も再現できる.



(a) ユークリッド距離による等方ボロノイ図



(b) 2次形式距離による非等方ボロノイ図

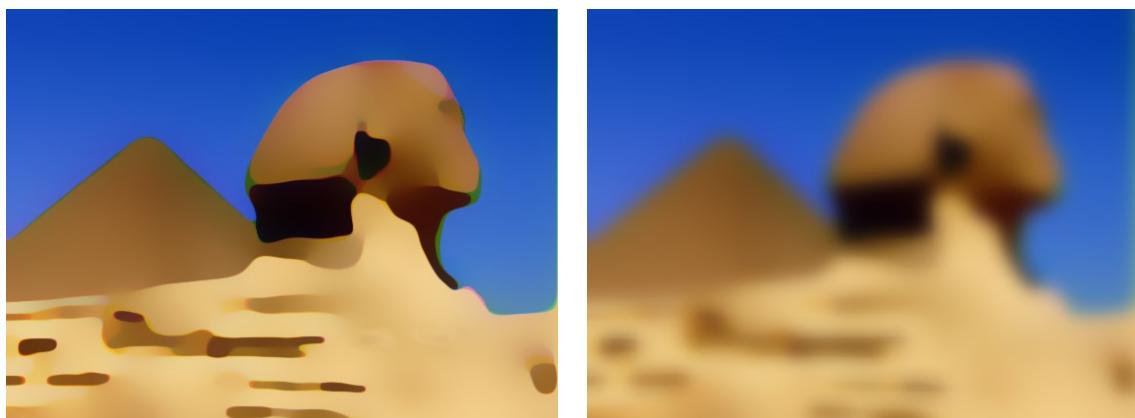


(c) バイラテラル距離による非等方ボロノイ図

図 B.2 各手法による等方ボロノイ図

Fig.B.2 Voronoi images by each method.

次の実験はスフィンクスの画像に関する実験である。図 B.3(a) (563*422)は入力画像で、図 B.3(b)は Paint Shop のガウスぼかし(半径 10)でぼかした画像である。母点の結果を図 B.3(c)に示す。



(a) 入力画像

(b) ぼかした画像

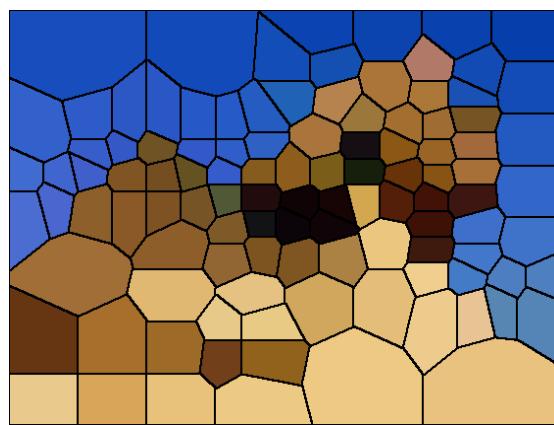
(c) 4 分木分割による母点図

図 B.3 実験例 2

Fig.B.3 Example 2.

ユークリッド距離による等方ボロノイ図は図 B.4(a)に示す。境界線は直線なので、スフィンクスの頭や背部のピラミッドのエッジを表現することが難しい。2次形式距離によって非等方ボロノイ図を生成し、微小セルを除去した結果を図 B.4(b)に示す($\alpha=3$)。境界線は曲線になったが、エッジを保存することがまだ不充分である。バイラテラル距離による非等方ボロノイ図の結果は図 C.2(c)である($\alpha=3$)。ユークリッド距離による等方ボロノイ図と2次形式距離による非等方ボロノイ図より、左のピラミッドのエッジを表現できる。そして、右のスフィンクスに対して、頭の形だけではなく、目など詳細部分まで再現できるので、エッジの保存性が高い。

以上では、バイラテラル距離による非等方ボロノイ図とユークリッド距離による等方ボロノイ図および2次形式距離による非等方ボロノイ図を比較した。エッジなどに関して、バイラテラル距離による非等方ボロノイ図の手法を利用すると、画像構造の表現性が向上した。その有効性を実験で示した。



(a) ユークリッド距離による等方ボロノイ図



(b) 2次形式距離による非等方ボロノイ図



(c) バイラテラル距離による非等方ボロノイ図

図 B.4 各手法による等方ボロノイ図

Fig.B.4 Voronoi images by each method.

付録 C ユークリッド距離による等方点描画と 2 次形式距離による非等方点描画およびバイラテラル距離による非等方点描画の比較

この論文では、バイラテラル距離による非等方点描画を描く手法を提案した。バイラテラル距離の式は

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + \alpha * (d - d_i)^2}$$

である。ここで x, y は各画素の x 座標と y 座標であり、 x_i, y_i は母点 i の x 座標と y 座標である。入力画像から画素値順 PDS 画像を生成する時、PDS 画像のサイズを $500*500$ にする。そして、非等方円を描く時、形を分かり易いようにするために、出力画像のサイズを拡大して $4000*4000$ にする。この拡大画像に、Paint Shop のガウスぼかし(半径 50)を 2 回かける。そのぼかした画像を $500*500$ に縮小し、画素値順 PDS 画像を生成する時に使うぼかした画像とする。

ユークリッド距離による等方点描画を生成する手法とは、ユークリッド距離の式 $\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}$ を用いて点を配置し、等方円の点描画を描くことである。

2 次形式距離による非等方点描画を描く手法とは、画素の勾配ベクトルを考え、点の勾配によって機能円を生成する手法である。バイラテラル距離の式を 2 次形式距離で近似すると

$$\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + \alpha * \left(g_{xi}(x - x_i) + g_{yi}(y - y_i) \right)^2}$$

となる。バイラテラル距離による非等方点描画を描く手法と同じように入力画像をぼかし、ぼかした入力画像にソーベルフィルタをかけて勾配ベクトルを求める。

一つの画像例での実験結果を以下の図に示す。バイラテラル距離と 2 次形式距離では、同じ α の値を使っている(以下の実験ではすべて、同じ α の値を使う)。図 C.1(a)は入力画像(500*500)である。エッジの付近で非等方性が過剰に強くなりすぎるので、勾配の変化を緩めるために、入力画像をぼかす。ぼかし方は上で述べた。ぼかした画像の結果は図 C.1(b)である。図 C.1(c)は、ユークリッド距離による PDS の結果である。2 次形式距離による PDS の結果とバイラテラル距離による PDS の結果を図 C.1(d)と図 C.1(e)に示す。PDS の a と b は $a = 8$, $b = 15$ である。そして、点描画の結果は図 C.2 に示す(2 次形式距離による非等方点描画とバイラテラル距離による非等方点描画の $\alpha = 1.5$)。

図 C.3 には、図 C.2 に口の一部分を拡大した図を示す。図 C.3(a)には、点描画の結果はすべて丸円ですが、エッジや各部分の流れなどを判断することは困難である。図 C.3(c)の結果は図 C.2(b)の結果より、エッジに近くなればなるほど、非等方円の形が自動的に円から線状セグメントに変えられ、特に口のエッジの付近では、非等方円の歪みが非常に強いので、エッジの乱れが減少する。それで、本稿で提案する手法は輪郭の保存性が向上し、画像構造の表現性が高い。

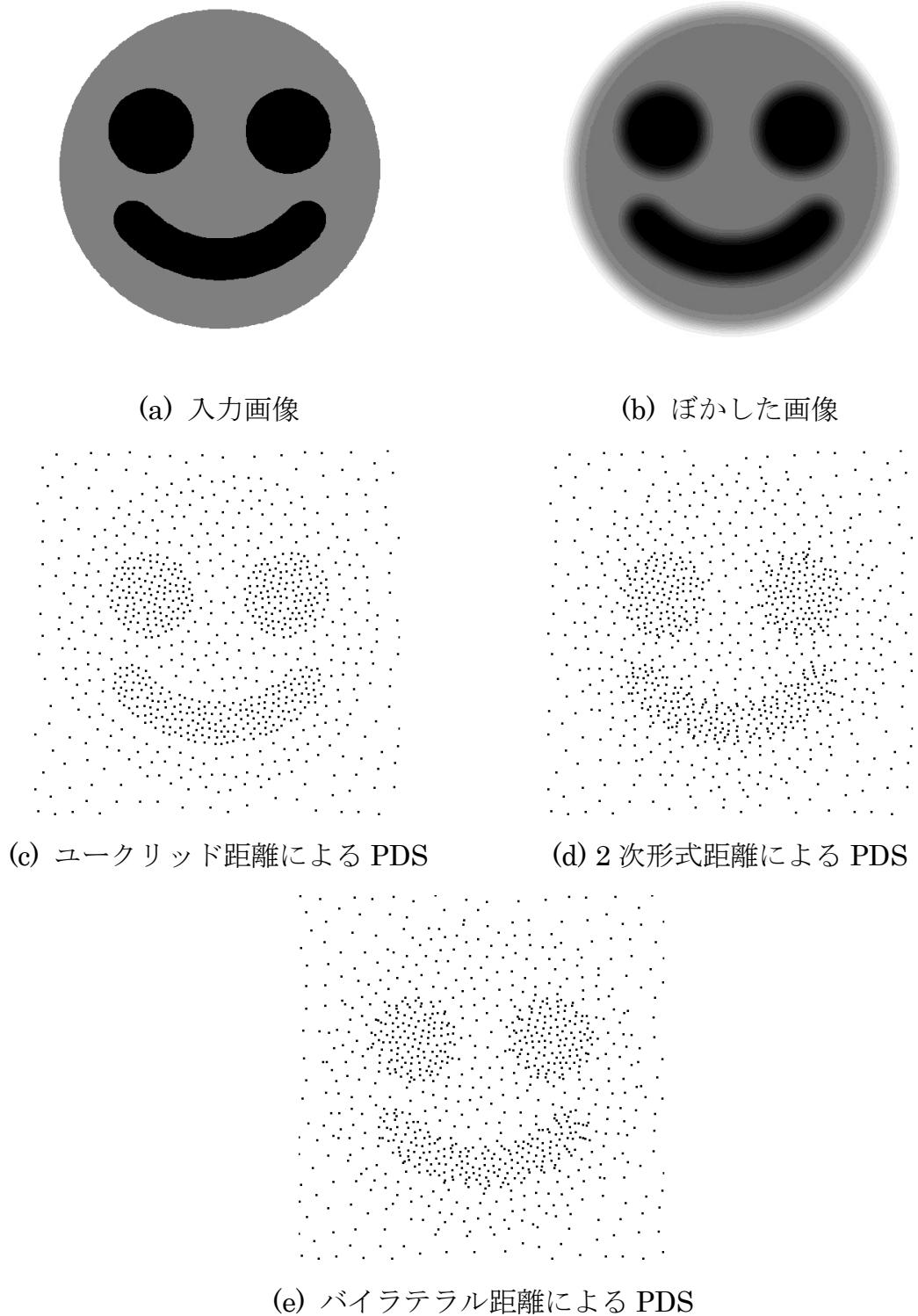


図 C.1 PDS の実験例 1

Fig.C.1 Example 1 of PDS.

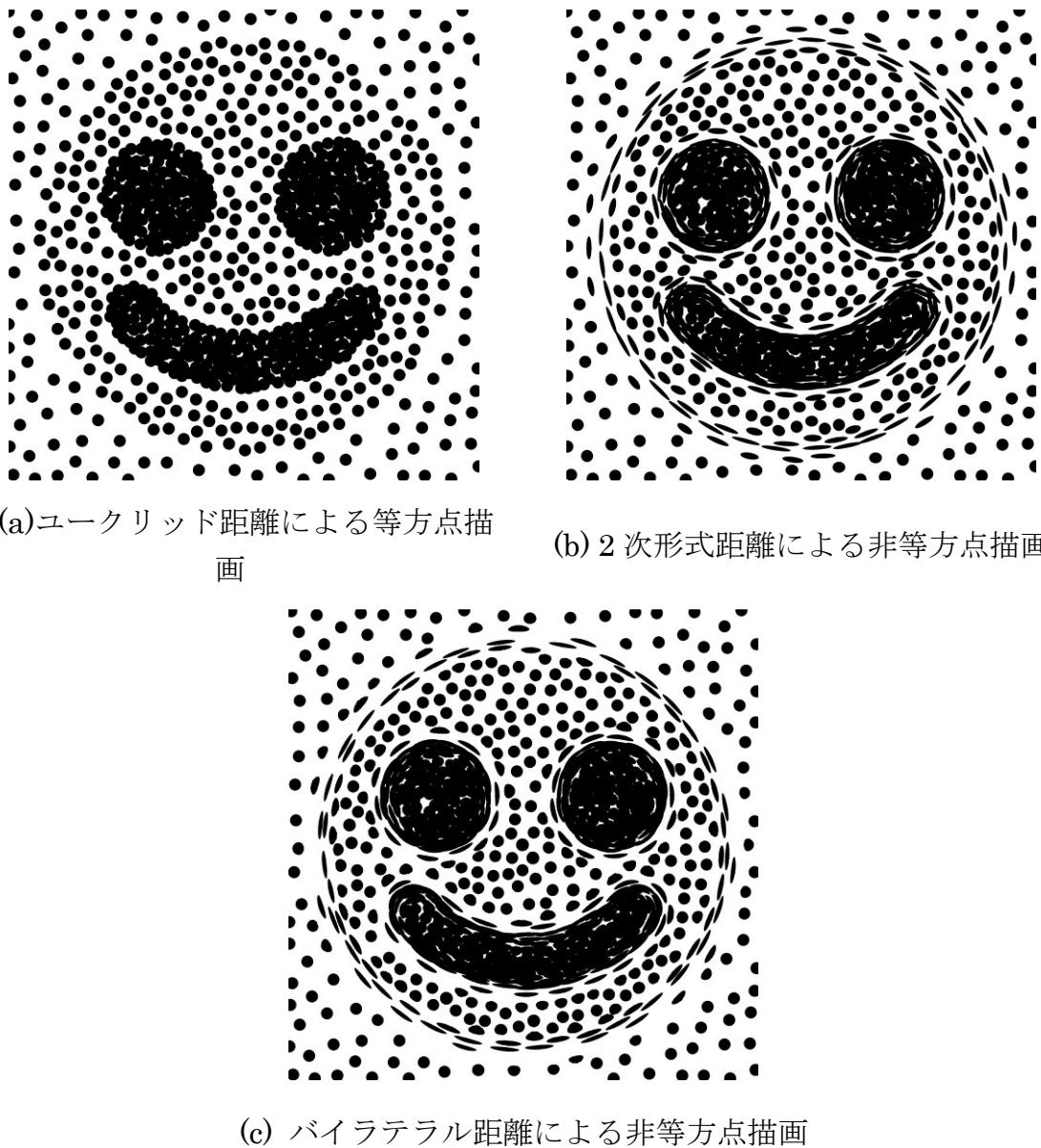


図 C.2 図 C.1 の結果による点描画

Fig.C.2 Stippling images based on Fig.C.1.



(a) 図 C.2(a)の一部

(b) 図 C.2(b)の一部



(c) 図 C.2(c)の一部

図 C.3 図 C.2 の一部を拡大した画像

Fig.C.3 Magnified parts in Fig.C.2.

次の実験は Mona Lisa の画像に関する実験である。図 C.4(a) (500*500) は入力画像で、図 C.4(b) はぼかした画像である。 $\alpha = 1$ とした。ユークリッド距離による PDS の結果を図 C.4(c) に示す。2 次形式距離による PDS の結果とバイラテラル距離による PDS の結果を図 C.4(d) と図 C.4(e) に示す。PDS の a と b は $a = 5$, $b = 10$ である。

点描画の結果は図 C.5 に示す。図 C.6 には、図 C.5 の一部分を拡大した図を示す。図 C.6(a), 図 C.6(b) より図 C.6(c) の結果に、グレースケールの勾配に沿って非等方円の形状が強化され、物体の輪郭付近の保存性が向上している。

3 番目の実験結果を図 C.7 に示す。 $\alpha = 0.5$ とした。入力画像は図 C.7(a) (500*500) であり、ぼかした画像は図 C.7(b) である。ユークリッド距離による PDS の結果を図 C.7(c) に示す。2 次形式距離による PDS の結果とバイラテラル距離による PDS の結果を図 C.7(d) と図 C.7(e) に示す。PDS の a と b は $a = 5$, $b = 10$ である。

図 C.7(a) では唐辛子のへたが細長いので、その歪みを再現することが難しい。バイラテラル距離によって、非等方円でへたを再現することができる。2 次形式距離による非等方点描画より、バイラテラル距離による非等方点描画のほうが、保存性が高く、ロバスト性が向上する。

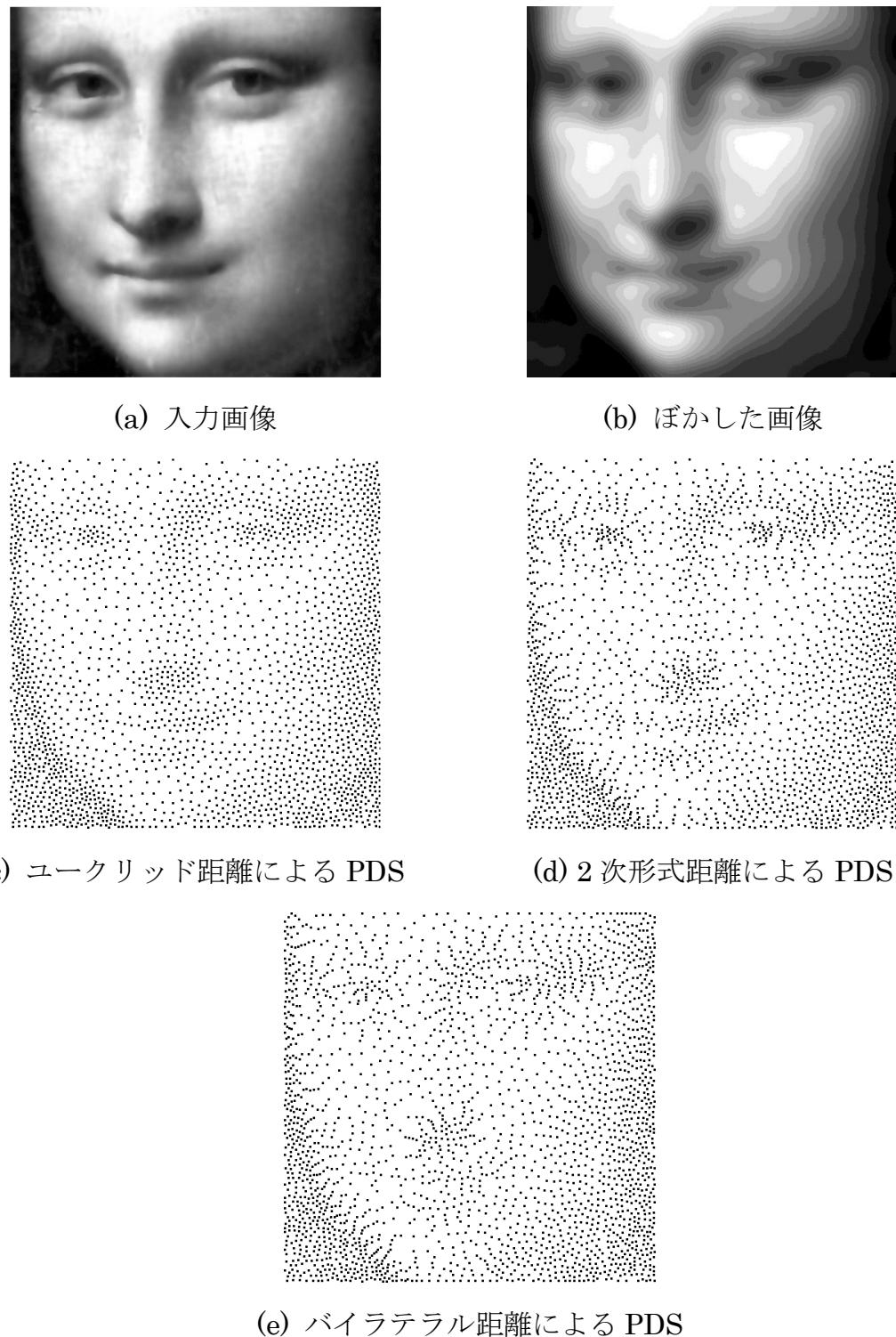


図 C.4 PDS の実験例 2

Fig.C.4 Example 2 of PDS.

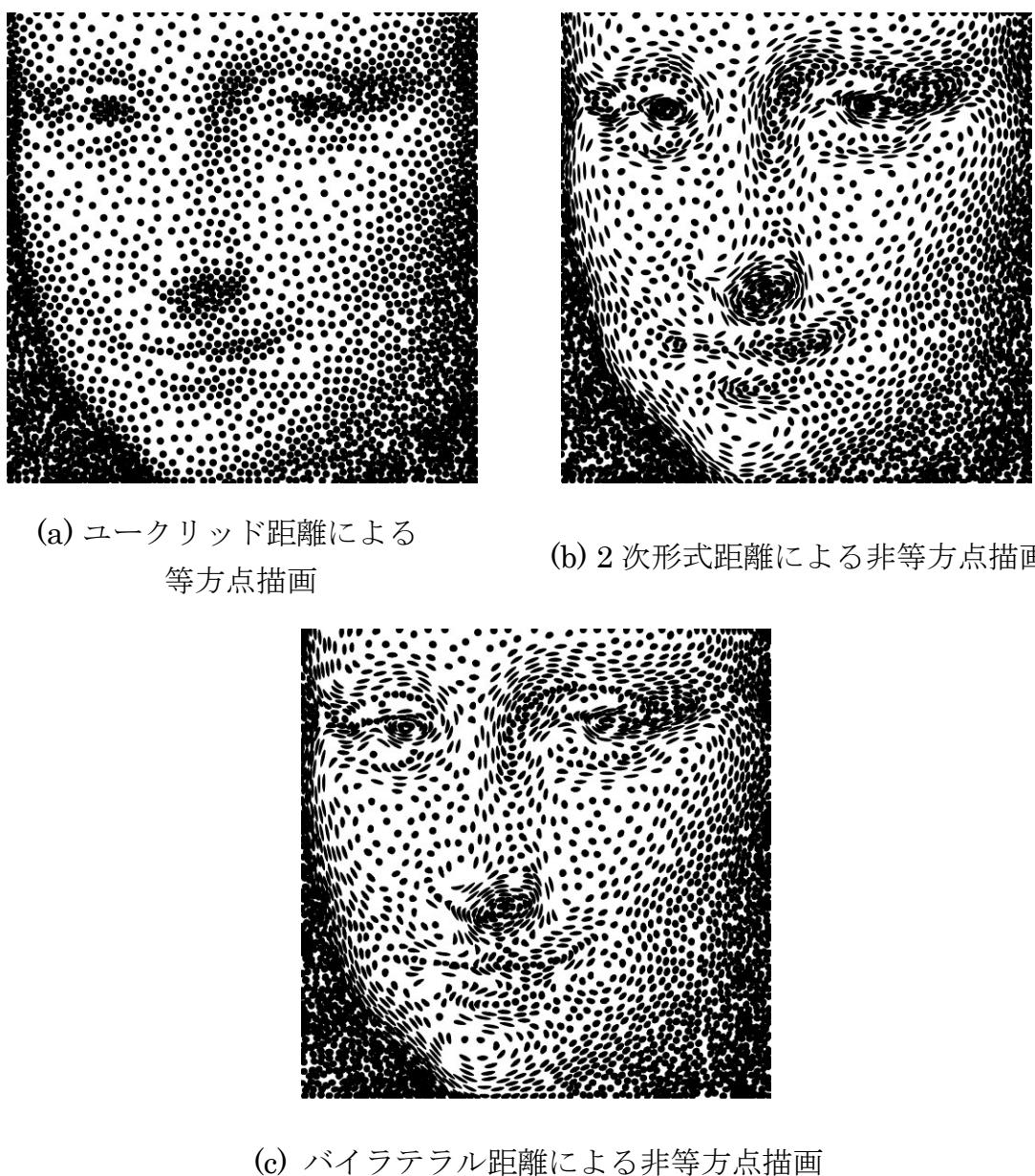
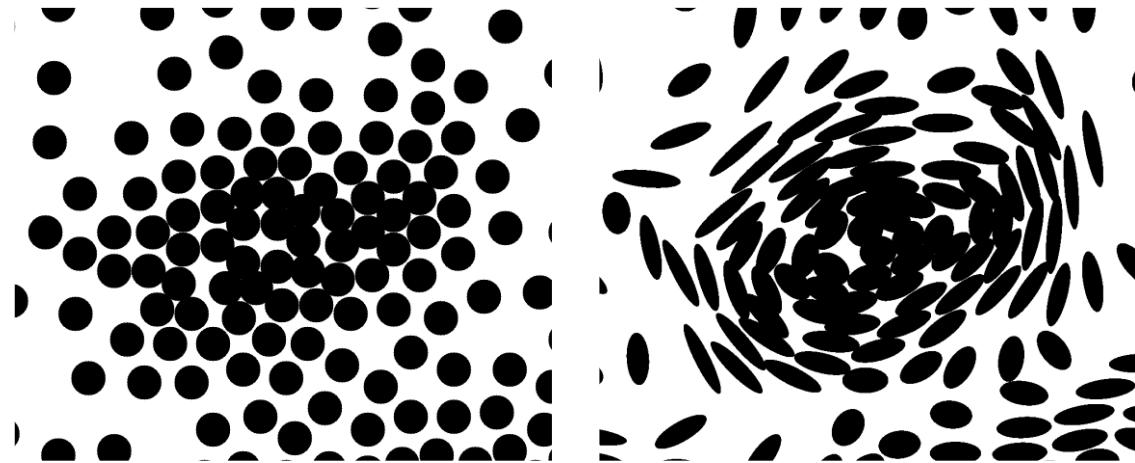


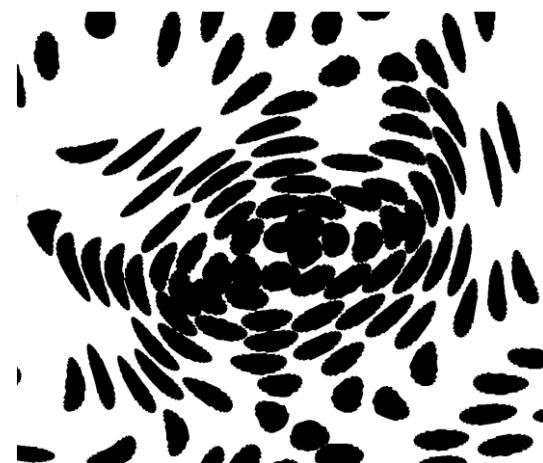
図 C.5 図 C.4 の結果による点描画

Fig.C.5 Stippling images based on Fig.C.4.



(a) 図 C.5(a)の一部

(b) 図 C.5(b)の一部



(c) 図 C.5(c)の一部

図 C.6 C.5 の一部を拡大した画像

Fig.C.6 Magnified parts in Fig.C.5.

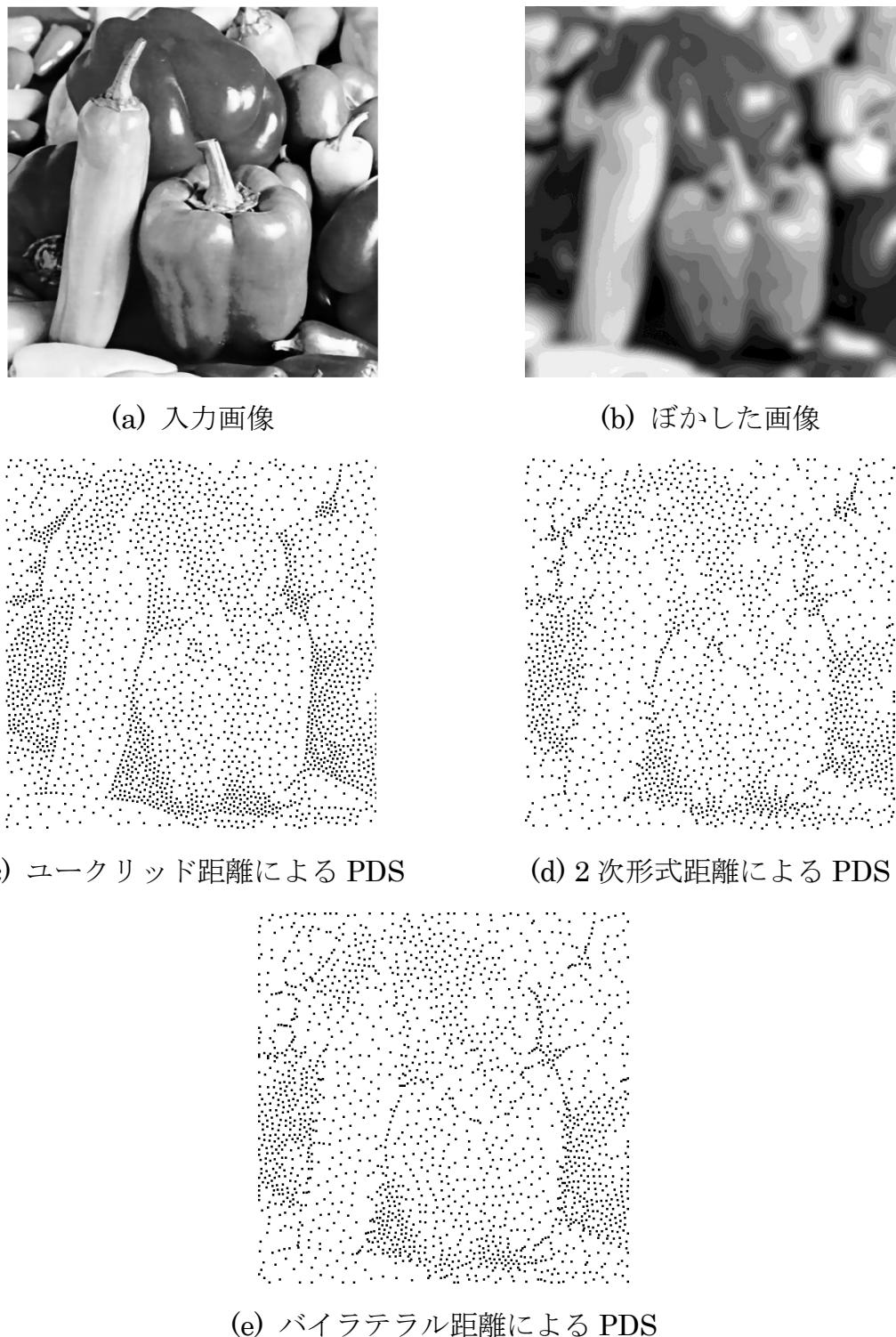


図 C.7 PDS の実験例 3

Fig.C.7 Example 3 of PDS.

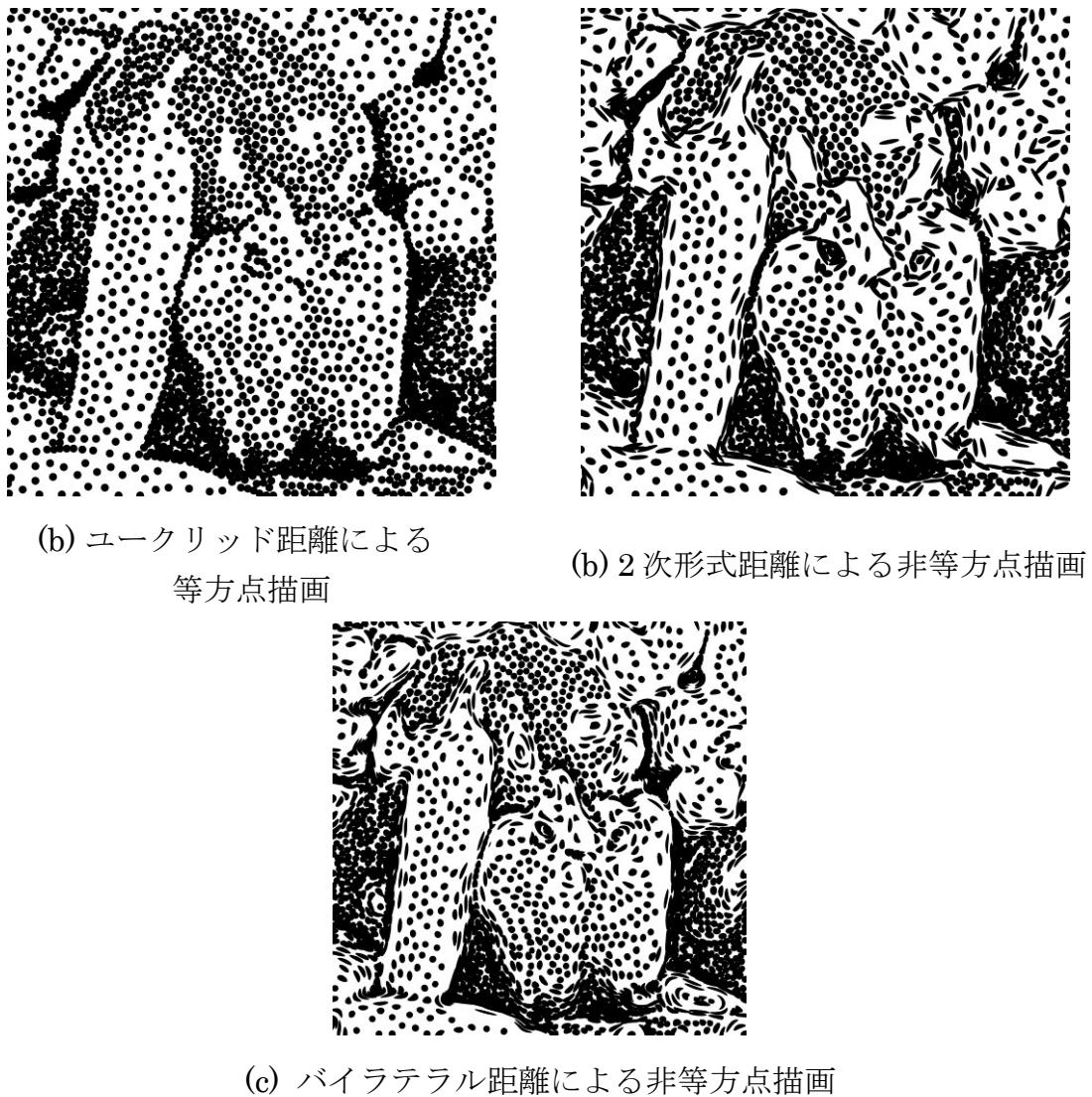


図 C.8 図 C.7 の結果による点描画

Fig.C.8 Stippling images based on Fig.C.7.

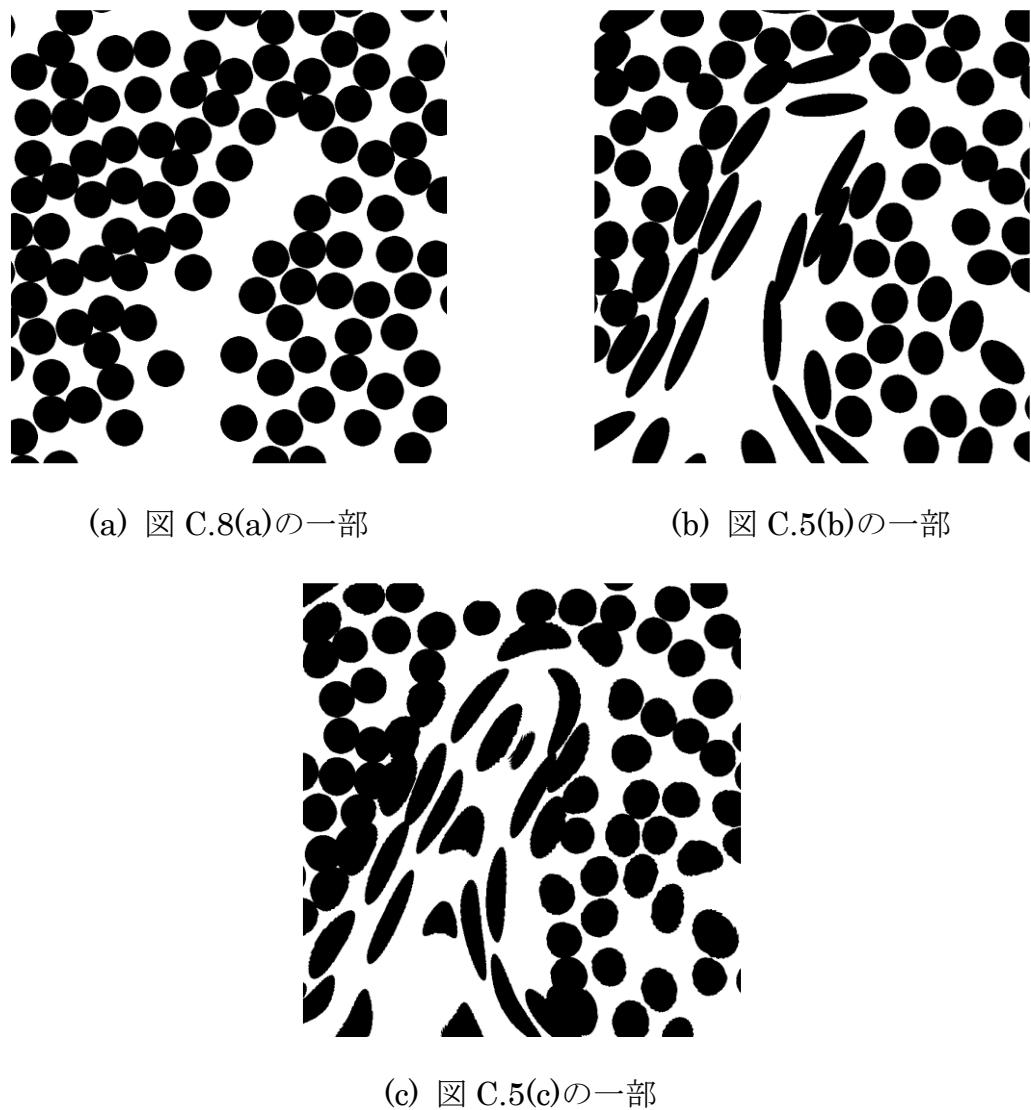


図 C.9 図 C.8 の一部を拡大した画像

Fig.C.9 Magnified parts in Fig.C.8.

以上では、バイラテラル距離による非等方点描画とユークリッド距離による等方点描画と 2 次形式距離による非等方点描画を比較した。エッジなどに関して、バイラテラル距離による非等方点描画の手法を利用すると、画像構造の表現性が向上した。その有効性を実験で示した。