

東京電機大学

博 士 論 文

非写実的画像生成のための
サンプリング法とカラーモデルの研究
Sampling Methods and Color Model
for Non-photorealistic Rendering

2018 年 3 月

杉田 純一

あらまし

コンピュータグラフィックス分野において、画家が描く絵やイラストのような非写実的な画像を生成する技術は、ノンフォトリアリスティックレンダリング (Non-photorealistic rendering: NPR) と呼ばれる。本論文では、NPR のなかでもブラシストロークモデルと呼ばれる手法を扱う。ブラシストロークモデルでは、キャンバス (無地の出力用画像) にブラシストロークを多数描画することで、絵画風画像を生成する。ブラシストロークモデルでは、ストロークの配置、属性 (大きさ, 色, 向き), 描画順序が生成結果の見た目に大きく影響を与える。本論文では、ストロークの配置、属性、描画順序を効果的に決定するための、サンプリング法とカラーモデルを提案する。これにより、2次元の入力画像から、絵画風画像を効果的に生成することが可能となる。

まず、Scalable Poisson Disk Sampling (SPDS) 法に基づく絵画風画像生成法を提案する。SPDS 法により、良好なストロークの配置、属性、描画順序を決定することが可能となる。さらに、SPDS 法には、パラメータを変更することでストロークの配置や属性をコントロールできる利点がある。提案手法により、貼り絵、水彩画、油絵の各絵画風画像を生成できることを示す。

次に、絵具の混色を再現するために、RYB カラーモデルの利用を提案する。RYB カラーモデルは、美術教育で用いられている、赤、黄、青を三原色とする減法混色モデルである。これをコンピュータで利用するために、RGB 色空間と RYB 色空間の相互変換式を提案する。さらに、RYB 色空間で混色を行うことにより、実際の絵具の混色に近い結果を得ることが可能となる。また、RYB カラーモデルのその他の応用例についても検討する。

最後に、スーラの色彩理論に基づく点描画風画像生成手法を提案する。スーラの点描画の特徴は、視覚混合、補色対比、Halo 効果などの技法を巧みに利用している点である。この中でも中心となる技法は視覚混合である。視覚混合は、絵具をパレットで混ぜるのではなく、異なる色の点を並置させることにより網膜上で加法混色を起こす現象である。本研究では、効果的な視覚混合を実現するために、点描ハーフトーニング法を提案する。点描ハーフトーニング法は、Poisson Disk Sampling の高速化手法である Boundary Sampling の空間的データ構造を利用し、ランダムに配置された点に対

して誤差拡散法を適用する手法である．これにより，少ない色数で入力画像の諧調を再現することが可能となる．また，点描ハーフトニング法を拡張し **Stippling** を生成する．この位置に補色を描画することで，陰影を表現する．さらに，自然な **Halo** を生成するために，アンシャープマスクを拡張した手法を提案する．実験により，スーラの特徴を考慮した点描画風画像を生成可能であることを示す．

本論文は，サンプリング法やカラーモデルを工夫することで，高品質な非写実的画像を生成可能であることを示すものである．

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	ノンフォトリアリスティックレンダリング	1
1.1.2	ブラシストロークモデル	4
1.1.3	絵具の混色	6
1.1.4	視覚混合による混色	7
1.2	本研究の目的	9
1.2.1	Scalable Poisson Disk Sampling (SPDS) 法に基づく絵画風画像生成法	9
1.2.2	RYB カラーモデルとその応用	10
1.2.3	スーラの色彩理論に基づく点描画風画像生成法	10
1.3	本研究の成果	10
1.4	本論文の構成	11
第2章	従来研究	13
2.1	絵画風画像生成手法	13
2.1.1	貼り絵風画像の生成に関する手法	13
2.1.2	水彩画風画像の生成に関する手法	14
2.1.3	油絵風画像の生成に関する手法	15
2.2	RYB カラーモデルに関する研究	15
2.2.1	RYB to RGB 変換	15
2.2.2	RYB カラーモデルの応用	16
2.3	点描画風画像の生成に関する手法	17
2.3.1	一般的な点描画を対象とした手法	17
2.3.2	視覚混合を取り入れた手法	17
2.3.3	スーラの特徴を考慮した手法	18
第3章	Scalable Poisson Disk Sampling に基づく絵画風画像生成法	19
3.1	はじめに	19

3.2	モデリング	20
3.2.1	Scalable Poisson Disk Sampling 法	21
3.2.2	色差による円の配置判定	23
3.2.3	テクスチャの色	23
3.2.4	テクスチャの向き	24
3.2.5	テクスチャの大きさ	25
3.2.6	モデリングのまとめ	26
3.3	レンダリング	27
3.3.1	貼り絵の特徴	29
3.3.2	水彩画の特徴	31
3.3.3	油絵の特徴	32
3.3.4	レンダリングのまとめ	35
3.4	実験結果	36
3.4.1	絵画風画像生成結果	36
3.4.2	パラメータが生成結果に与える影響	39
3.4.3	貼り絵風画像の生成例	40
3.4.4	水彩画風画像の生成例	43
3.4.5	油絵風画像の生成例	45
3.4.6	パラメータと生成時間の関係	47
3.4.6.1	重なるの許容係数 α と生成時間との関係	48
3.4.6.2	画素数と生成時間との関係	49
3.4.6.3	半径の最大値 r_{max} と生成時間との関係	50
3.4.6.4	色差の閾値 t と生成時間の関係	51
3.5	まとめ	52
第4章	RYB カラーモデルとその応用	54
4.1	はじめに	54
4.2	RYB カラーモデル	56
4.2.1	RGB カラーモデル	56
4.2.2	RYB カラーモデル	57

4.2.3	RGB カラーモデルと RYB カラーモデルの関係	58
4.3	RGB-RYB 変換.....	59
4.3.1	RGB to RYB 変換	60
4.3.2	RYB to RGB 変換	61
4.4	混色法	63
4.4.1	単純加算法.....	63
4.4.2	アルファブレンディング	63
4.4.3	重み付き加算法.....	64
4.5	実験結果	64
4.5.1	実装された RYB カラーモデルの全体像.....	64
4.5.2	混色結果.....	67
4.5.2.1	カラーチャートの比較.....	67
4.5.2.2	絵具の混色の再現性.....	69
4.5.2.3	パラメータの影響	71
4.5.3	変換誤差	73
4.5.4	RYB カラーモデルの応用.....	73
4.5.4.1	色指定インタフェース	73
4.5.4.2	ストロークレンダリング	74
4.5.4.3	水彩画風画像生成への応用	75
4.5.4.4	可視化.....	77
4.6	まとめ	79
第5章	スーラの色彩理論に基づく点描画風画像生成法	80
5.1	はじめに	80
5.2	点描画風画像生成法	83
5.2.1	Halo 効果	84
5.2.2	点描ハーフトーニング法.....	86
5.2.2.1	Boundary Sampling.....	86
5.2.2.2	誤差拡散法.....	87
5.2.2.3	点描ハーフトーニング法の効果.....	88

5.2.3	補色対比.....	89
5.2.3.1	Stippling の生成.....	90
5.2.3.2	補色の求め方.....	90
5.2.3.3	補色の描画結果.....	91
5.2.4	エボシュ.....	92
5.2.5	ストロークレンダリング.....	92
5.3	実験結果.....	94
5.3.1	点描画風画像の生成.....	94
5.3.2	スーラの点描画の再現性.....	95
5.3.3	実際のスーラの作品との比較.....	96
5.3.4	パラメータが生成結果に与える影響.....	97
5.3.5	従来手法との比較.....	99
5.4	まとめ.....	101
第6章	結論.....	102
6.1	本研究のまとめ.....	102
6.2	今後の課題.....	103
6.3	本研究の商用利用.....	103
付録A	RGB 色空間から RYB 色空間への変換式の導出詳細.....	104
付録B	多様なストロークと RYB カラーモデルによる混色に基づく 水彩画風画像生成法.....	106
B.1	はじめに.....	106
B.2	提案手法.....	106
B.3	実験結果.....	108
B.4	まとめ.....	109
謝辞	110
参考文献	111

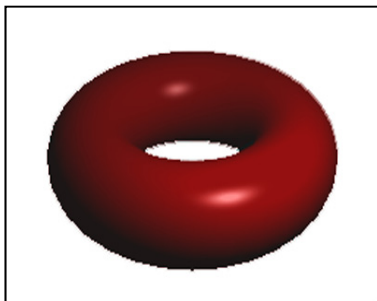
第 1 章

序論

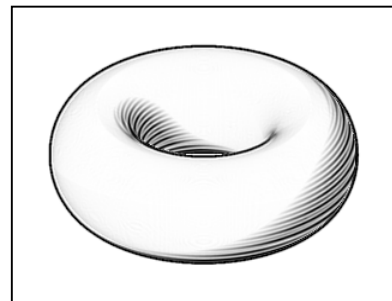
1.1 本研究の背景

1.1.1 ノンフォトリアリスティックレンダリング

1970 年代, コンピュータグラフィックス (CG: Computer Graphics) の産業応用を目的とし, 様々な技術が開発された. 当時の CG の主たる研究対象は, カメラで撮影した写真のような写実的な画像を生成することであり, それ以降, 写実的な映像表現はフォトリアリスティックレンダリング (PR: Photorealistic Rendering) と呼ばれ, CG 分野の主題として発展してきた. フォトリアリスティックレンダリングでは, 視点に到達する光を物理的に忠実にシミュレーションすることが主な課題といえる. 図 1.1 (a) に, フォトリアリスティックレンダリングの代表的な手法の一つである光線追跡法 [1] で生成した画像を示す.



(a) PR



(b) NPR [4]

図 1.1 フォトリアリスティックレンダリングと NPR

Fig. 1.1 Photorealistic rendering and non-photorealistic rendering

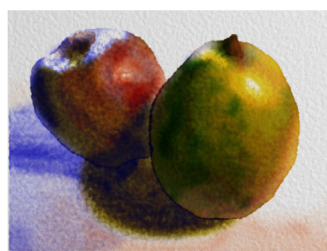
1990年代から絵やイラストのような非写実的な映像表現に関する研究開発が盛んになり，これらはノンフォトリアリスティックレンダリング (NPR: Non-photorealistic Rendering)[2,3] と呼ばれ，現在ではCGの一分野として確立されている．ありのままの情景を記録する写真に対して，絵やイラストはその情景のなかの一部の情報だけを伝えたい場合や，作者の意図や感性を盛り込みたい場合に適している．図 1.1 (b) にイラスト調にレンダリングされた画像 [4] を示す．図 1.1 (b) は同図 (a) に比べて，輪郭と陰影が強調されていることがわかる．

表現の目的や対象によって，適切な NPR 手法は異なるため，様々な NPR 手法が開発されている．NPR を表現の目的という視点でみると，既存絵画技法のシミュレーションと情報伝達を目的とした手法に大別できる．

既存絵画技法のシミュレーション：油絵 [5,6,7]，水彩画 [8,9]，ペン画 [10]，色鉛筆画 [11]，銅版画 [12,13]などの手書きの絵画をコンピュータでシミュレーションする手法は，NPR の代表的な研究対象に分類される．図 1.2 に既存絵画技法のシミュレーションの従来研究の例を示す．図 1.2 (a) は油絵 [5]，同図 (b) は水彩画 [8]，同図 (c) はペン画 [10]，同図 (d) は色鉛筆画 [11]，同図 (e) はメゾチントによる銅版画 [13] のシミュレーション例である．



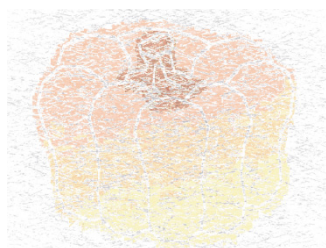
(a) 油絵 [5]



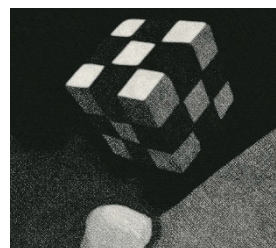
(b) 水彩画 [8]



(c) ペン画 [10]



(d) 色鉛筆画 [11]



(e) 銅版画 [13]

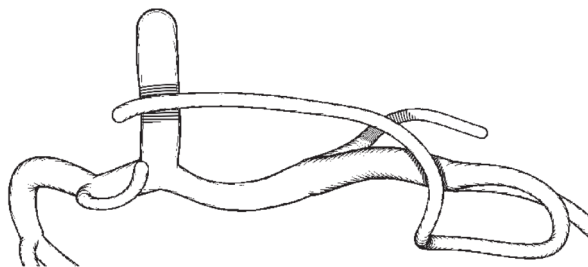
図 1.2 既存絵画技法のシミュレーションの従来手法

Fig. 1.2 Conventional methods of simulation for existing art techniques

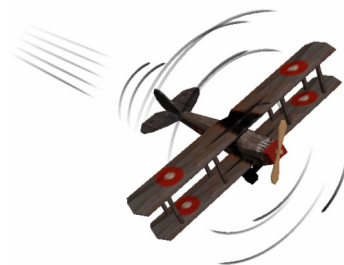
本分類には、さらに、物理シミュレーションとビジュアルシミュレーションの2つのアプローチがある。物理シミュレーションでは、絵具や紙などの画材や描画過程を忠実にシミュレーションすることで画像が生成される。ビジュアルシミュレーションは、最終的に生成される結果の見た目を、対象となる画風に一致させることを目的とするものである。

情報伝達を目的とした NPR 手法: ありのままの情景を伝える写真とは異なり、絵やイラストは、その情景の一部の情報だけを伝達したい場合や作者の意図を盛り込みたい場合に適している。絵やイラストは、情報の強調や省略を施して描くことができるからである [3]。このような目的に NPR が用いられることがある。

図 1.3 に情報伝達を目的とした既存手法の例を示す。図 1.3 (a) は血管をイラスト調に描画した例である [14]。血管の前後関係を明確にするために、距離に応じて記号化された影を用いている。図 1.3 (b) では、3DCG アニメーションから抜き出した1枚の静止画に対し効果線を付加することにより、剛体運動の種類と速度を把握することを目的としている [15]。



(a) イラスト調描画 [14]



(b) 効果線の描画 [15]

図 1.3 情報伝達を目的とした既存手法の例

Fig. 1.3 An example of the conventional methods for the purpose of transmission of information

また、入力情報という視点から見ると、写真などの2次元画像を入力とするものと、3次元モデルを入力とするものの2つに大別される。2次元画像と3次元モデルをそれぞれ入力とした場合の利点と欠点を表 1.1 に示す。

表 1.1 入力の違いによる利点と欠点

Table 1.1 Advantages and disadvantages by 2D images or 3D models as inputs

入力	2 次元画像	3 次元モデル
利点	入手が容易	任意の視点からの描画が可能 面の方向を容易に算出可能 物体の境界の判定が容易
欠点	奥行き情報が無い 適切な領域分割が困難	入力データの作成が手間

本研究は、主に 2 次元画像を入力とする既存絵画技法のビジュアルシミュレーションに関連するものである。

1.1.2 ブラシストロークモデル

画家が描いた絵のような画像を出力する技術は Painterly Rendering [16] と呼ばれ、NPR のなかでも主要な研究テーマとなっている。本研究では、Painterly Rendering のなかでもストロークを用いた絵画風画像生成について扱う。多くの絵画において、ストロークは基本となる要素である。ストロークを用いた手法は、Haeberli が提案したストローク生成手法 [17] が基礎となっている。以降この手法をブラシストロークモデルと呼ぶ。ブラシストロークモデルでは、ブラシストロークを画面に多数描画することで、絵画風画像を生成する。処理手順を以下に示す。

Step1: 元になる入力画像と、出力用の無地の画像 (キャンバス) を用意する。

Step2: 入力画像の中から画素を 1 つ選択する。

Step3: Step2 で選択した画素の位置に対応するキャンバス上の位置に、ストロークをその画素の色で描画する。

Step4: 上記 Step2, 3 の処理を多数の画素に対して実行する。

図 1.4 に Haeberli のブラシストロークモデルによる生成例 [17] を示す。

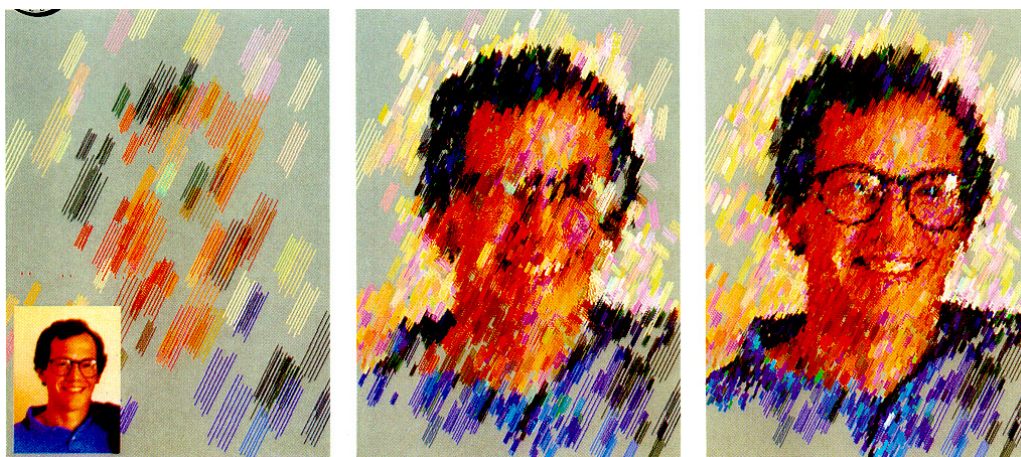


図 1.4 ブラシストロークモデルによる生成例 [17]

Fig.1.4 An example of the generation result based on the brush stroke model [17]

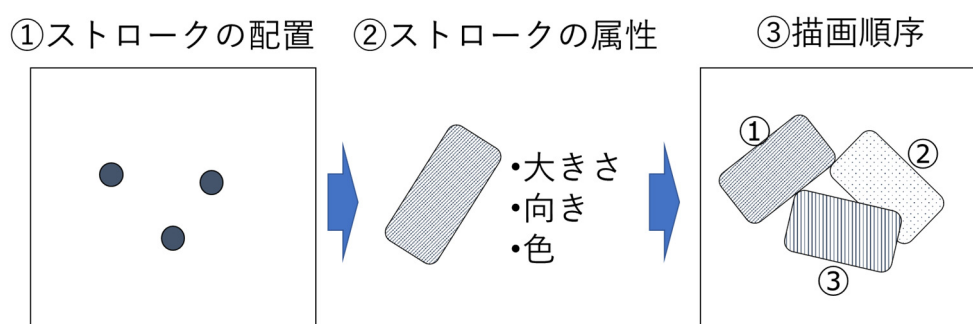


図 1.5 ブラシストロークモデルの構成要素

Fig. 1.5 Fundamental components of brush stroke model

図 1.5 にブラシストロークモデルの構成要素を示す. ブラシストロークモデルでは, まず, ストロークを配置する位置を決定する必要がある. 次に, 決定した位置での各ストロークの属性 (大きさ, 色, 向き) を決定する. 最後に, ストロークの描画順序を決め, ストロークを描画することで絵画風画像が生成される.

ブラシストロークモデルでは, これらの構成要素が生成結果に大きく影響を与える. その良しあしに絶対的なものではなく, 絵を描く目的, 対象, 見る人の好みなどに依存する.

一般に, ストロークはキャンバス内に一様かつランダムに配置される. このときのストロークの密度も見た目に影響を与える要因となる. また, 配置するストロークの

大きさや向きも生成結果に影響を与える。前述したように、これらの良しあしは画風やユーザの好みによって変わってくるため、ある程度コントロールできることが望ましい。

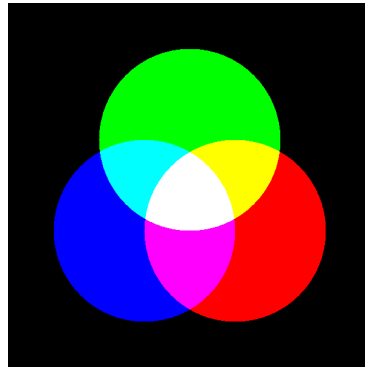
1.1.3 絵具の混色

絵画において、色は作品の見た目に影響を与える重要な要素のひとつである。従来のブラシストロークモデルを用いた手法では、ストロークの色は入力画像の色をそのまま用いることが多い。しかしながら、透明絵具を用いてストロークを描く場合、ストロークが重なった部分は混色される。図 1.6 に示すように、絵具が乾く前に次の絵具を塗り重ねた場合は、重なった部分が混色され、別の色になる [8]。絵具の混色は減法混色である。一方、コンピュータでは RGB (Red-Green-Blue) カラーモデルが用いられる。RGB カラーモデルは、赤、緑、青を三原色とする加法混色モデルである (図 1.7 (a))。加法混色モデルである RGB カラーモデルでは、絵具の混色を表現することが難しい。したがって、絵具の混色を再現できる手法が必要となる。

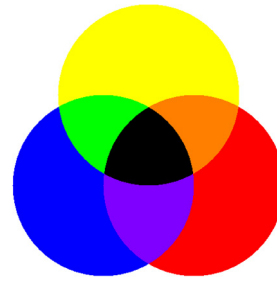


図 1.6 絵具の混色の例 [8]

Fig. 1.6 An example of pigment compositing



(a) RGB カラーモデル



(b) RYB カラーモデル

図 1.7 カラーモデル

Fig. 1.7 Color Models

近代の色彩論の提唱者として、ニュートン (Sir Isaac Newton; 1642-1727)[18] が挙げられる。その後、ニュートンの色彩論を基礎として、ゲーテ (Johann Wolfgang von Goethe; 1749-1832)[19], シュブルール (Michel-Eugène Chevreul; 1786-1889)[20], ルード (Ogden Nicholas Rood; 1831-1902)[21] らにより色彩論は発展してきた。また、今日の色彩論の普及は、イッテン (Johannes Itten; 1888-1967)[22]によるところが大きい。イッテンの RYB (Red-Yellow-Blue) カラーモデル [22] は現代の美術教育の基礎となっている。RYB カラーモデルは、絵具の理想的な混色を経験的にモデル化したものである。

RYB カラーモデルは、赤、黄、青を三原色とする、減法混色モデルである (図 1.7 (b))。RYB カラーモデルは現実世界では幅広く利用されているが、コンピュータでは RGB カラーモデルが用いられている。RYB カラーモデルをコンピュータで利用できるようになれば、絵具の混色をコンピュータで再現することができる。そのためには、RGB 色空間と RYB 色空間を相互に変換できる必要がある。

1.1.4 視覚混合による混色

印象派の絵画は、筆触分割という技法によって描かれている [23, 24]。筆触分割は、パレット上で色を混ぜるのではなく、異なる原色をそのままキャンバスに並置させて描くことによって、視覚混合 [23, 24] により混色する技法である。視覚混合とは、異なる色を並置させることにより網膜上で加法混色を起こす現象である。図 1.8 に示す

例では，赤と青を並置させることにより，紫に見える．印象派の絵画を再現する場合
には，筆触分割により視覚混合を再現することが必要となる．

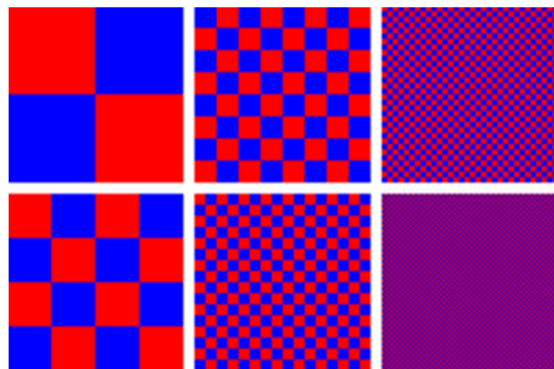


図 1.8 視覚混合の例

Fig.1.8 An example of an optical mixture

印象派のなかでも，後期印象派の画家は，色彩理論をより厳密に作品に取り入れる
ようになる．後期印象派の代表的な画家のひとりに，スーラ (Georges Seurat; 1859-
1891)[23] が挙げられる．スーラは印象派の筆触分割をさらに押し進め，点描技法を
確立した．スーラの点描画の特徴は，視覚混合 [23,24]，補色対比，Halo 効果 [25,26]
などの理論を厳密に作品に適用した点である．

補色対比 [23,24] は，補色関係にある色を並置させることにより，より鮮やかに見
える効果である．図 1.9 に補色対比の例を示す．青の補色である赤を背景にした，右
の画像の方が，青色が鮮やかに見える．

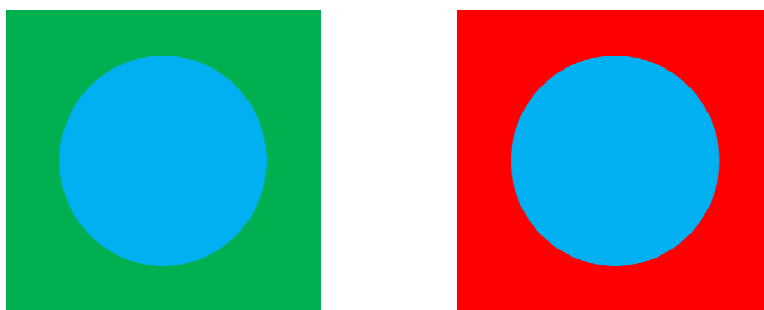


図 1.9 補色対比の例

Fig.1.9 An example of a complementary color contrast

Halo 効果 [25,26] とは、物体の背景の明暗を強調することにより、物体を際立たせる効果である。図 1.10 に Halo 効果の例を示す [25]。背景の明度を低く表示した物体が浮き上がって見える。

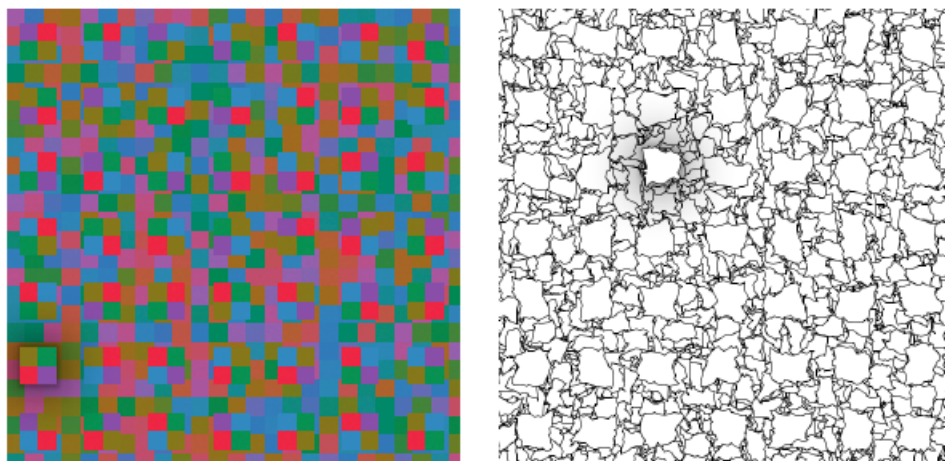


図 1.10 Halo 効果の例 [25]

Fig.1.10 Examples of a halo effect [25]

1.2 本研究の目的

本研究では、ブラシストロークモデルに基づいて、2次元の入力画像から様々な画風の絵画風画像を自動生成することを主な目的とする。前節で述べたように、ブラシストロークモデルでは、ストロークの配置、属性 (大きさ, 向き, 色) が重要となる。また、ストロークが重なった部分の絵具の混色と、視覚混合による混色技法がそれぞれ必用となる。これらを効果的に実現するための手法を提案する。

1.2.1 Scalable Poisson Disk Sampling (SPDS) 法に基づく絵画風画像生成法

Scalable Poisson Disk Sampling (SPDS) 法に基づく絵画風画像生成法を提案する。SPDS 法により、効果的なストロークの配置を実現することができる。SPDS 法は、キャンバス内に異なる大きさの円をランダム、かつ、一様に配置可能なサンプリング法である。SPDS 法により配置した円をストロークテクスチャに置き換えて描画する。

この結果に、画風特有の効果を付加することにより絵画風画像を生成する．具体的には、貼り絵、水彩画、油絵の各絵画風画像が生成可能である．提案手法には、パラメータを変更することでストロークの配置や大きさを変更できる利点がある．これにより、ユーザの好みを反映させた結果を得ることが可能となる．

1.2.2 RYB カラーモデルとその応用

絵具の混色を再現するために RYB カラーモデル [22] に基づいた混色法を提案する．RYB カラーモデルは、美術分野で用いられている、赤、黄、青を三原色とする減法混色モデルである．RYB カラーモデルをコンピュータで利用するために、RGB 色空間と RYB 色空間の相互変換式を提案する．これにより、RYB 色空間での混色が可能となる．RYB 色空間で混色を行うことにより、絵具の混色に近い結果を簡単に得られることを示す．また、RYB カラーモデルの応用例についても、あわせて提案する．

1.2.3 スーラの色彩理論に基づく点描画風画像生成法

スーラは後期印象派を代表する画家である．スーラの点描画の特徴は、視覚混合、補色対比、Halo 効果などの理論を作品に厳密に適用している点である．

本研究では、2次元の入力画像から、視覚混合、補色対比、Halo 効果などのスーラの技法を考慮した点描画風画像を自動生成することを目的とする．

視覚混合を実現するために、点描ハーフトーニング法を提案する．点描ハーフトーニング法は、ランダムに配置された点に対して誤差拡散法を適用する手法である．点描ハーフトーニング法により、少ない色数で入力画像の諧調を再現することが可能となる．視覚混合の他に、補色対比や Halo 効果などのスーラの点描画の特徴を実現する手法もあわせて提案する．

実験により、提案手法がスーラの画風を再現した点描画風画像を生成可能であることを示す．

1.3 本研究の成果

以下に、本研究の成果をまとめる．

(1) 様々な画風の絵画風画像の自動生成

本研究により，1つの入力画像から様々な画風の絵画風画像を自動生成することが可能となった．具体的には，貼り絵，水彩画，油絵の各絵画風画像を生成することが可能である．本研究の利点として，ストロークの配置や属性をパラメータによりコントロールできることが挙げられる．

(2) RYB カラーモデルのコンピュータでの利用

RGB 色空間から RYB 色空間への変換とその逆変換が可能となった．これにより，コンピュータで RYB カラーモデルを使用できるようになった．RYB 色空間で混色を行うことにより，絵具の混色を簡単に再現できるようになった．ストロークの混色を考慮した水彩画風画像生成法をはじめとした，RYB カラーモデルの応用例を示した．

(3) スーラの画風を模擬した点描画風画像の自動生成

スーラの色彩理論に基づく点描画風画像を生成することが可能となった．特に，良好な視覚混合を実現するために，点描ハーフトーニング法を提案した．点描ハーフトーニング法により，視覚混合を用いて少ない色数で入力画像の諧調を再現できるようになった．実験により，視覚混合，補色対比，Halo 効果などが効果的に実現できていることが示された．

1.4 本論文の構成

以下に，本論文の構成を示す．

第1章 序論

本研究の背景，目的，および得られた成果について述べる．

第2章 従来研究

絵画風画像生成に関する従来研究，RYB カラーモデルに関する関連研究，スーラの画風を考慮した点描画風画像生成に関する従来研究についてまとめる．

第3章 Scalable Poisson Disk Sampling 法に基づく絵画風画像生成法

Scalable Poisson Disk Sampling 法に基づく絵画風画像生成法について述べる．具体的には，2次元の入力画像から，貼り絵，水彩画，油絵の各絵画風画像を生成可能であることを示す．

第4章 RYB カラーモデルとその応用

RGB 色空間から RYB 色空間への相互変換の方法，および，RYB 空間上での混色方法について述べる．また，RYB カラーモデルの応用についても紹介する．

第5章 スーラの色彩理論に基づく点描画風画像生成法

2次元の入力画像から，スーラの色彩理論に基づく点描画風画像を自動生成する手法について述べる．

第6章 結論

本研究の内容と成果，および今後に残された課題についてまとめることにより，本論文の結論とする．

第 2 章

従来研究

本章では、絵画風画像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) 手法、RYB カラーモデルに関する従来研究、スーラの色彩理論を考慮した点描画風画像生成手法に関する従来研究について述べる。

2.1 絵画風画像生成手法

本節では、既存の絵画風画像生成手法について説明する。提案手法は、複数の画風の絵画風画像を生成することができるが、既存手法は一つの画風に特化した手法が多い。ここでは、画風ごとに従来手法を紹介する。

2.1.1 貼り絵風画像の生成に関する手法

貼り絵風画像を生成する既存の手法として、ボロノイ図を利用したものがある [27, 28, 29]。Seo ら [27] は画像をボロノイ分割し、各ボロノイ領域を色紙片に置き換えることで貼り絵風画像を生成した。ボロノイ領域の色紙片への置き換えは、まず、一つのボロノイ領域を表と裏の 2 層とし、表をボロノイ領域の色、裏を白とする。次に、各層のボロノイ辺に独立に中点変位法を用いることでボロノイ領域を色紙片に見立てている。しかし、この方法では母点がランダムに配置されるため、入力画像のエッジが表現されない。また、ボロノイ図はボロノイ領域の大きさが概ね均一になるので、画像の細部を表現するためには小さい色紙片で貼る必要がある。

この点を改善するために、Seo ら [28] は画像を手作業で領域分割した後、領域毎にボロノイ分割を行っている。しかし、手作業による領域分割が非常に煩雑になる弱点がある。

ジョハンら [29] は、母点配置を最適化することで、エッジを考慮した貼り絵風画像を自動的に生成した。また、Perlin Noise [30] を用いて画用紙のような紙の質感を表現している。

貼り絵に似た NPR 手法として、モザイク画生成法 [31, 32] が挙げられる。モザイク画のタイルを色紙片に置き換えることで貼り絵風画像を生成することができると考えられる。しかし、両手法とも、領域分割を行った後、各領域内をタイルで敷き詰めているが、領域分割を手作業で行う必要があり、ボロノイ分割法 [28] と同様の問題点がある。

井上ら [33] は画像を円板の集合で近似 (色円板分布近似) し、円を色紙片に置き換えることで、自動的に貼り絵風画像を生成している。円の中心と内部の色差をある閾値と比較することで、エッジを考慮した画像生成に成功している。さらに、井上ら [34] は円板を楕円に拡張 (カラー楕円板分布近似) し、同様の手法で貼り絵風画像を生成した。しかし、このアルゴリズムはその性質上、輝度変化が少なくなるべく広い領域を探して1枚の色紙片で貼るように働くため、貼られる色紙片の大きさが異なってしまう。その結果、色紙片の大きさに統一性がなくなってしまう。実際の貼り絵では、一領域内はほぼ同じ大きさの色紙片を貼ることが多いので、貼り絵らしい表現力に問題がある。

牧野ら [35] は、井上らの色円板分布近似法を基に、色紙の凹凸をエンボスフィルタで表現し、ノイズテクスチャを合成することで、紙の質感を表現している。しかし、この手法は近似的なものであり、光源の変更による影の変化までは対応することができない。

2.1.2 水彩画風画像の生成に関する手法

水彩画風画像を生成する既存の手法として、Curtis ら [8] の手法がある。Curtis らは、Kubelka-Munk 理論 [36] に基づく絵具の混色モデルを提案し、水彩画の各技法や効果の物理シミュレーションに成功している。

Bousseau ら [9] は、入力画像を抽象化 (Abstraction) し、その結果に水彩画の各効果を模したテクスチャを合成することで、水彩画風画像を生成している。

ジョハンら [37] は、画家の描画技法を模擬するために、描画規則を用いてストロ

ークを生成し、水彩画風画像を生成している。

これらの従来手法は、水彩画風画像の生成に特化した手法であり、その他の絵画風画像を生成することはできない。

2.1.3 油絵風画像の生成に関する手法

油絵風画像生成手法の多くは、Haeberli [17] によって提案されたブラシストロークモデルがベースとなっている。この手法は、ペインタリー・レンダリング (Painterly Rendering) とも呼ばれている。油絵風画像はブラシストロークと呼ばれる、絵筆の一描きを模したテクスチャ画像をキャンバスに多数描画することで生成される。

Shiraishi と Yamaguchi [6] は、画像モーメントを用いて、テクスチャの配置や属性を自動的に決定する手法を提案している。しかし、テクスチャの配置や属性によって、生成結果の印象が大きく変わるが、Shiraishi と Yamaguchi の手法では、それらを自動的に決定するための手法なので、生成結果のバリエーションの自由度が低い。

Hertzmann [7] は、異なる大きさのブラシストロークを用いて、様々なバリエーションの油絵風画像の生成に成功している。しかし、油絵以外の絵画風画像を生成することはできない。

2.2 RYB カラーモデルに関する研究

イッテンの RYB カラーモデル [22] は、アナログ世界で広く利用されている。RYB カラーモデルは、赤、黄、青を三原色とする減法混色モデルである。RYB カラーモデルをコンピュータで利用するために、RGB 色空間と RYB 色空間の相互変換が必用となる。しかしながら、RGB 色空間と RYB 色空間を相互変化する従来研究は、ほとんど見当たらない。

2.2.1 RYB to RGB 変換

筆者が調査した限りでは、Gossett と Chen [38] の手法が RYB 色空間から RGB 色空間へ変換する唯一の従来研究である。Gossett と Chen は、トリリニア補間を用いた手法を提案している。図 2.1 に示す RYB 立方体の各頂点に、RGB 値を定義し、RYB 空

間の各座標に対応する RGB 値を，トリリニア補間を用いて求める．しかしながら，Gossett と Chen の論文には，RGB 色空間から RYB 色空間への変換法の詳細が記述されておらず，RYB 立方体に定義された RGB 値の根拠の詳細も書かれていない．また，補間により色空間を変換しているため，この手法は非可逆変換である．

RYB カラーモデルをコンピュータで利用するためには，数学的な変換式の提案が期待される．

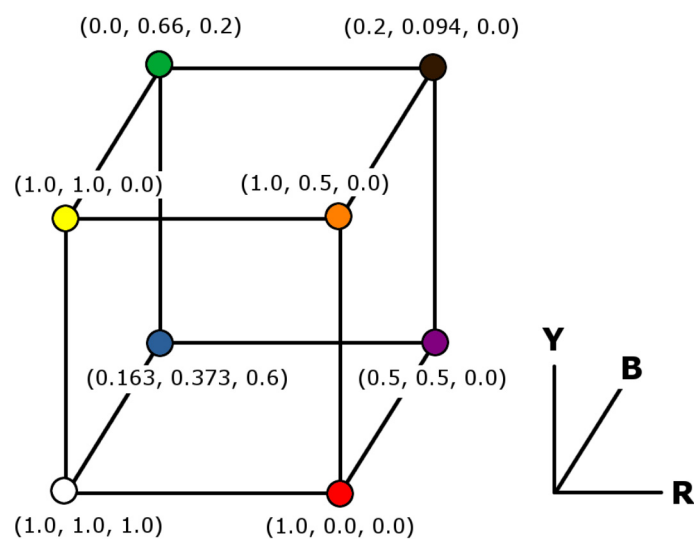


図 2.1 Gossett と Chen の手法 [38]

Fig.2.1 The method by Gossett and Chen [38]

2.2.2 RYB カラーモデルの応用

前述したように，RYB カラーモデルは現実世界で広く利用されている．RYB カラーモデルがコンピュータで簡単に利用できるようなになれば，様々なコンピュータアプリケーションへの応用が期待できる．ここでは，RYB カラーモデルの応用研究について紹介する．

RYB カラーモデルは，多属性データの可視化に利用されている [38, 39]．可視化の分野において，色は情報の付加的属性を人間の視覚特性に基づき符号化することができる．RYB カラーモデルは，絵具の混色に近い結果を実現できるため，情報の可視化との親和性が高いといえる．

Constable と Zhang [40] は、既存の絵画の色相解析のために RYB 色相環を用いている。Zhang ら [41] は RYB カラーモデルに基づいて絵画の特徴を写真に転写する手法を提案している。

このように、RYB カラーモデルは様々なコンピュータアプリケーションへの応用が期待できるため、RGB 色空間と RYB 色空間の相互変換式の提案は有益であると考えられる。

2.3 点描画風画像の生成に関する手法

新印象派の代表的な画家であるスーラは、ブラン [42]、シュブール [20]、ルード [21] の著書を基に、色彩理論を構築していった。スーラの点描画の特徴は、視覚混合、補色対比、Halo 効果などの理論を作品に厳密に取り入れている点である。本節では、点描画風画像を生成する従来手法について述べる。

2.3.1 一般的な点描画を対象とした手法

Hertzmann [7] は異なる大きさの曲がったブラシストロークを用いて、点描画を含む様々なスタイルの絵画風画像の生成に成功している。また、Hays と Essa [43] は静止画だけではなく動画を入力として、点描画を含む様々なスタイルの絵画風画像を生成している。しかしながら、両手法共にストロークの色は入力画像の色をランダムに変更するか、揺らぎを与えて変更するのみに留まっている。これらの手法では、前述したスーラの特徴が考慮されていない。

2.3.2 視覚混合を取り入れた手法

Luong ら [44] と Jin ら [45] は、視覚混合を考慮した点描画風画像生成手法を提案している。ストロークの輝度を入力画像の輝度と同じにすることで、入力画像の知覚を再現するよう工夫している。Hausner [46] は、Centroidal Voronoi Diagram (CVD)[47]の母点をノードとする連結グラフを構築し、近傍のノードに誤差を拡散することで、ランダムに配置された点に対して誤差拡散法を適用し視覚混合を実現している。しかしながら、これらの手法は視覚混合以外の点描画の特徴については実現されていない。

2.3.3 スーラの特徴を考慮した手法

スーラの画風を考慮した点描画風画像生成手法として Yang と Yang [48], Seo と Yoon [49] の手法がある．両手法共に視覚混合，補色対比，Halo 効果を含むスーラの点描画の特徴を再現している．

視覚混合を実現するために，両手法とも，入力画像の色に揺らぎを与えてストロークの色を変更している．しかしながら，ロカルな情報に基づいて色を決定していたため，良好な視覚混合を実現できていない．提案手法では，ハーフトーニングの一手法である誤差拡散法を利用することで，良好な視覚混合を実現することができる．Yang ら，Seo らの手法は，72 の色相数を必要とするが，提案手法では 11 の色相数で，入力画像の色調を再現することができる．

Seo らは補色による陰影表現を考慮しているが，Yang らの手法では考慮されていない．Yang らの手法では，補色は一様に分布される．

Yang ら，Seo ら両手法ともに，Halo 効果を実現している．しかしながら，両手法ともに，入力画像の明度が極端に高い，または，低い領域において良好な Halo が生成されないという欠点がある．提案手法では，この問題を解決した Halo を実現する．

Yang らの手法，Seo らの手法，提案手法の比較を表 2.1 に示す．

表 2.1 スーラの特徴を考慮した点描画風画像の従来法との比較

Table 2.1 Comparison with previous pointilistic image generation methods based on a Seurat's color theory

	Yang et al.	Seo et al.	提案手法
少ない色数での視覚混合	△	△	○
色数	72	72	11
補色による陰影表現	×	○	○
自然な Halo 効果	△	△	○

第3章

Scalable Poisson Disk Sampling 法に基づく 絵画風画像生成法

3.1 はじめに

本章では，2次元画像から絵画風画像を自動生成するための手法を提案する．具体的には，貼り絵，水彩画，油絵の3種類の画風を再現する．本研究では，キャンバス(無地の出力用画像)に千切った色紙片やブラシストロークを模したテクスチャを多数描画し，絵画の特徴を表した効果を付加することで，絵画風画像を生成する．

提案手法の概要を図3.1に示す．提案手法は(1)モデリングと(2)レンダリングの2段階からなる．

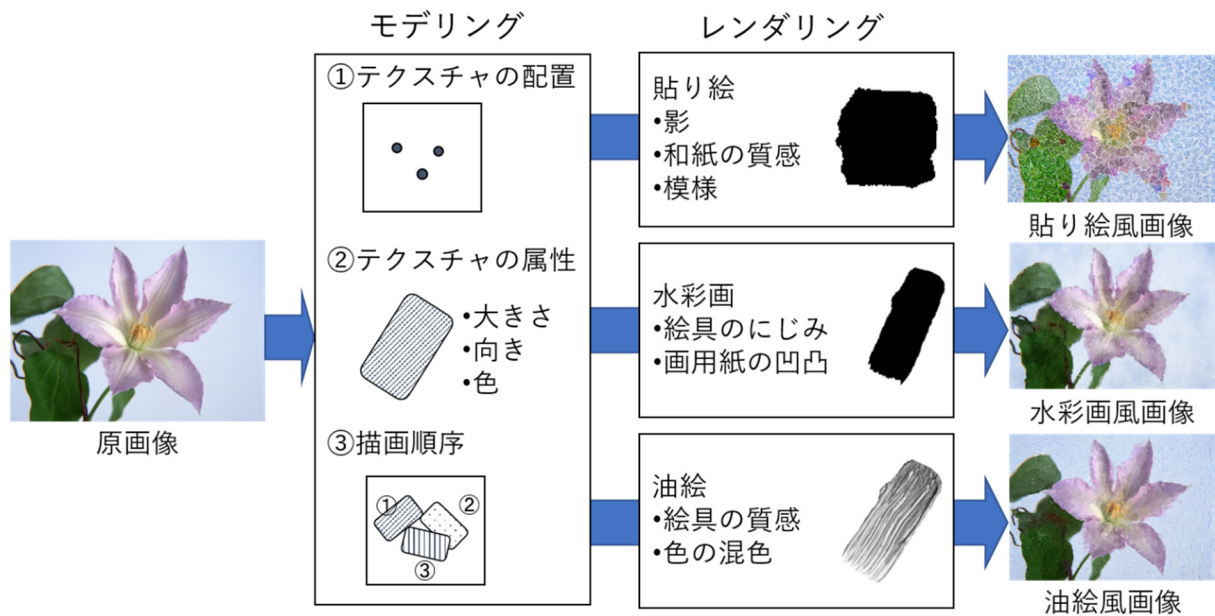


図 3.1 絵画風画像生成法の概要

Fig.3.1 Overview of the method for generating artistic style images

(1) モデリング

モデリングでは、Scalable Poisson Disk Sampling 法 (以下、SPDS 法と記す) を用いてテクスチャの配置、その位置でのテクスチャの属性 (色, 大きさ, 向き), 描画順序を決定する。

生成結果の印象は、キャンバスに描画するテクスチャの大きさや間隔によって大きく左右される。その良しあしに絶対的なものではなく、絵を描く目的, 対象, 見る人の好みなどに依存する。従って、テクスチャの大きさや間隔はユーザが自由に変更することができる方が望ましい。提案手法はこれらをパラメータとして与え、ユーザが対話的に変更することで、テクスチャの大きさや間隔を容易に制御することができる。そのため、バリエーションに富んだ絵画風画像を生成することができるので、ユーザの好みに合った結果画像を得ることができる。

(2) レンダリング

レンダリングでは、モデリングにより配置されたテクスチャを画風に応じて処理し、各絵画特有の効果を付加して描画する。例えば、絵画特有の効果として、油絵ならば絵具の厚みやかすれ、水彩画ならば絵具のにじみや画用紙の凹凸などが挙げられる。これにより、様々な画風の絵画風画像を生成する。

3.2 モデリング

モデリングでは、描画するテクスチャの位置, 属性 (色, 大きさ, 向き), 描画順序を決定する。これらの中で、位置と大きさ, それに描画順序は、SPDS 法によって決定される。向きと色は入力画像との関係で決まる。テクスチャを着色・描画する色は SPDS 法の円の中心の座標に対応する入力画像の画素の色に基づいて決定される。テクスチャを描画する向きは、ランダムに回転させる方法と、SPDS 法の円の中心の座標の輝度勾配を基に決定する方法がある。

以下に、概要を述べる。

(1) **位置**：テクスチャを描画する位置は SPDS 法により決定する。

- (2) **大きさ**: テクスチャの大きさは SPDS 法の円の半径 r の大きさに応じて決定する.
- (3) **向き**: 貼り絵はランダムにテクスチャを回転させる. その他の絵画風画像は各サンプリング点の輝度勾配を基に決定する.
- (4) **色**: SPDS 法の円の中心の座標に対応する入力画像の画素の色に基づいて決定する.
- (5) **順序**: テクスチャを描画する順序は, SPDS 法のサンプリング順と同じとなる.
SPDS 法では, 大きい円から徐々に小さい円を配置するので, テクスチャも大きいものから徐々に小さいものが描画される. これは, 実際の絵画の描画手順と類似していると考えられる.

モデリングの中心となる技術は, Scalable Poisson Disk Sampling (SPDS) 法である. SPDS 法は, 有限の大きさの円を配置する手法で, 画面全体に偏りなく円をサンプリングすることができる. SPDS 法の円の半径 r に応じてテクスチャを拡大縮小し, 描画することで, 絵画風画像を生成する. SPDS 法を用いることにより, 描画するテクスチャの大きさや間隔を容易に制御することができる利点がある.

SPDS 法は, McCool と Fiume [50] によって提案された, Hierarchical Poisson Disk Sampling (HPDS) 法を拡張した手法である. HPDS 法では, まず, 画面全体に円を大まかにサンプリングし, それ以上円を配置することができなくなった場合, すでに配置した円の半径 r を $\angle r$ 画素小さくし, 再び, 画面内に円をサンプリングする. これを半径 $r = r_{max}$ から $r = r_{min}$ となるまで繰り返す. このアルゴリズムでは最終的に, 全ての円の大きさが同じになるが, 提案手法では, すでに配置した円の半径 r は変更せずに, 次に配置する円の半径 r を小さくするため, 円の大きさが同じにはならない. また, 入力画像のエッジを再現するために, 色差による配置判定処理を追加している. これらの点において, SPDS 法は, HPDS 法とは異なる.

3.2.1 Scalable Poisson Disk Sampling 法

SPDS 法を用いることにより, 円を画面全体に偏りなく配置する方法について述べる. 配置された円をテクスチャに置き換えることによって, 絵画風画像を生成する. まず, 半径 $r = r_{max}$ の円を考え, その中心となる点をランダムに配置する. すでに配

置された点の集合を $\{S_k\}$ とし、次に配置しようとする点を S_j とする。すでに配置された任意の点 $S_i \in \{S_k\}$ と点 S_j を中心とする円の半径をそれぞれ r_i , r_j とする。さらに、2 点 S_i と S_j の間の距離を d_{ij} とする。この時、 $d_{ij} \geq \alpha(r_i + r_j)$ ならば点 S_j を配置可能 (図 3.2 (a)) とし、 $d_{ij} < \alpha(r_i + r_j)$ ならば点 S_j を配置することは不可能 (図 3.2 (b)) とする。

しかし、この条件のみで配置を行った場合、円の許容係数 α の値が小さい場合は、小さい円が大きい円に完全に包含されてしまうことがある。大きい円の内部にある小さい円は不必要である。また、視覚的効果を損なう副作用もある。この問題を解決するために、 $d_{ij} < r_i$ となる場合は円を配置しない条件 (図 3.2 (c)) を追加する。

ある回数 (このサンプリング回数の上限を n とする) 以上連続して円を配置することが不可能であった場合、半径 $r = r_{min}$ となるまで r を $\angle r$ 画素小さくして、再び上記の処理を繰り返す。

こうして決定した円の中心位置に半径 r の値に応じて拡大縮小したテクスチャを描画していくことで、絵画風画像が生成される。

ここで、パラメータ α の値を変更することでテクスチャの重なりを制御することができる。すなわち、 α の値を 1 未満にすればテクスチャを重ねて描画することができ、 α の値を 1 より大きくすればテクスチャとテクスチャの間隔を開けて描画することができる。また、半径 r の最大値 r_{max} と最小値 r_{min} を変えることで、テクスチャの最大と最小の大きさを決定できる。

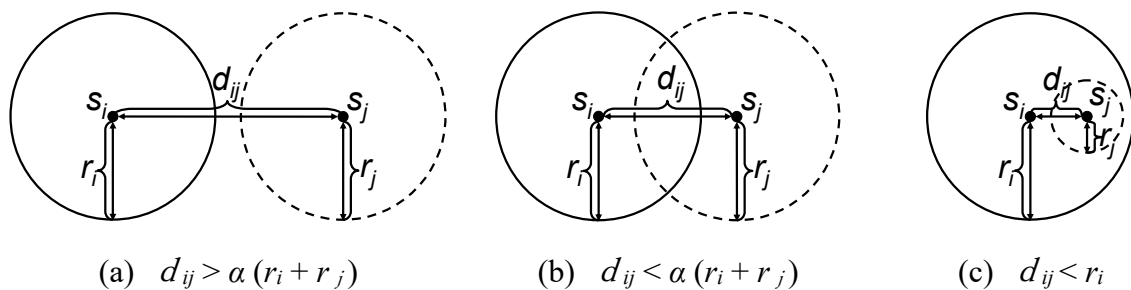


図 3.2 SPDS 法の円の配置判定

Fig.3.2 The method for determining disk placement

3.2.2 色差による円の配置判定

SPDS 法により決定した位置にテクスチャを貼り合わせるだけでは，入力画像のエッジが表現されない．そこで，色差による円の配置判定処理を加える．ここで，画素 P_i の RGB 値を (R_i, G_i, B_i) ，画素 P_j の RGB 値を (R_j, G_j, B_j) としたときの色差 C_{ij} を (R_i, G_i, B_i) と (R_j, G_j, B_j) の市街地距離として，式 (3.1) と定義する．

$$C_{ij} = |R_i - R_j| + |G_i - G_j| + |B_i - B_j| \quad (3.1)$$

前述の SPDS 法により配置可能と判定された点を中心とする半径 r の円を考える．この円の内部の全画素と円の中心の画素との色差が，ある閾値 t より大きいかどうかを比較する．閾値 t より小さい場合はこの円は配置可能とする．閾値 t より大きい場合は円の内部に色差の大きい領域が存在することになるので，この円は配置不可能と判定する．この結果，色差の大きい領域は面積の小さいテクスチャで，色差の小さい領域は面積の大きいテクスチャで描画されるようになる．

この処理を前項で述べた SPDS 法に基づく円の配置法に付加することによって，入力画像のエッジを表現することができる．

3.2.3 テクスチャの色

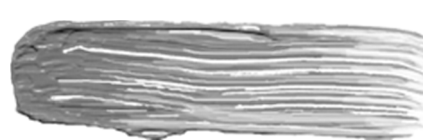
図 3.3 に示すテクスチャを多数描画することで，絵画風画像を生成する．テクスチャの色は，SPDS 法の円の中心の座標に対応する入力画像の画素の色に基づいて決定される．



(a) 貼り絵



(b) 水彩画



(c) 油絵

図 3.3 テクスチャ

Fig.3.3 Textures

(1) 貼り絵, 水彩画

貼り絵は, 色紙片 (図 3.3 (a)) の黒い部分を, 円の中心の位置に対応する入力画像の画素の色で塗りつぶす.

水彩画は, 図 3.3 (b) のテクスチャを円の中心の位置に対応する入力画像の画素の色で塗りつぶす.

(2) 油絵

油絵の絵筆テクスチャの色の変更処理は, HSI 色空間 [51] で行う. 図 3.3 (c) のテクスチャの色相を円の中心の位置に対応する入力画像の画素の色相に変更する. しかし, 絵筆テクスチャの色相を入力画像の画素の色相に変更しただけでは, 絵筆テクスチャと入力画像の画素との明度が異なるため, 入力画像の色が再現されない. そこで, 絵筆テクスチャの明度 I を式 (3.2) により求める.

$$I = I_t + I_i - I_{max} \quad (3.2)$$

ここで, I_i は入力画像の明度, I_t は元の絵筆テクスチャの明度, I_{max} は絵筆テクスチャの最頻出の明度を表す. これにより, 入力画像の色と絵筆テクスチャの色を一致させることができる.

3.2.4 テクスチャの向き

SPDS 法で決定した位置でのテクスチャの向きを決定する. テクスチャを描画する向きは, ランダムに回転させる方法と, SPDS 法の円の中心の座標の輝度勾配を基に決定する方法がある

(1) 貼り絵

貼り絵風画像のテクスチャの向きはランダムに決定する.

(2) 水彩画, 油絵

入力画像のエッジに沿った向きにテクスチャを配置する. テクスチャの向きは, テ

クスチャを描画する位置 (以下, サンプルング点と呼ぶ) での入力画像の輝度勾配を基に決定する. 輝度勾配の計算には, Edge tangent flow (ETF)[52] を用いる. ETF を用いることで, 入力画像の輝度勾配を, エッジに沿って滑らかに変化させることができる. 図 3.4 に示すように, ETF で求めた輝度勾配と直行する方向に, テクスチャを θ° 回転させて描画する.

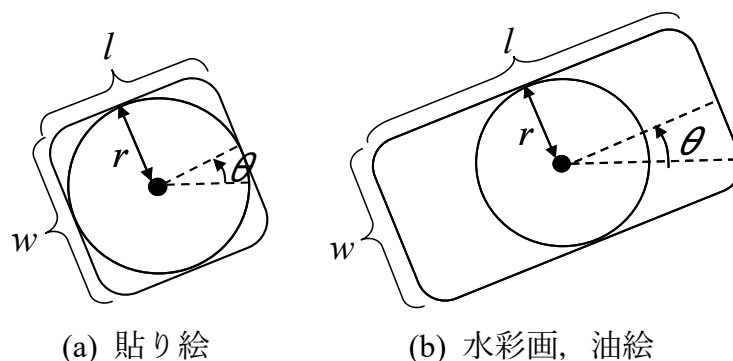


図 3.4 テクスチャの向きと大きさ

Fig. 3.4 Orientation and size of textures

3.2.5 テクスチャの大きさ

(1) 貼り絵

図 3.4 (a) に示すように, テクスチャの一辺の長さが $2r$ となるようにテクスチャを拡大縮小して描画する.

(2) 水彩画, 油絵

水彩画や油絵のストロークは, 貼り絵と違い, ある程度の長さを持って描かれる. 一方, テクスチャを描画する位置は, SPDS 法により決定されている. したがって, ストロークの長さが長過ぎると, 入力画像のエッジを横切って描いてしまう恐れがある. 図 3.4 (b) に示すように, テクスチャの幅 $w = 2r$ に対して, 長さ $l > 2r$ であれば, 入力画像のエッジ上にテクスチャが描画される可能性がある. それを避けるために, 次に述べるテクスチャの Clipping 処理 [53] を行う.

SPDS 法の円の中心から, ETF で求めた θ , $\theta + \pi$ の 2 方向に, 1 画素ずつ線分を伸ばすことを考える. 円の中心から距離 r だけ離れた点から 1 画素ずつ線分上を走査し,

円の中心との色差を求める．色差が閾値 t (3.2.2 項で使用した閾値と同じ値) より大きい場合は，エッジが存在するとし，処理を終了する．これによりストロークがエッジを横切らないテクスチャの長さ l が求まる．図 3.5 に Clipping 処理の有無の比較を示す．図 3.5 (a) は Clipping 処理なしでストロークを描画した結果，同図 (b) は Clipping 処理を行ってストロークを描画した結果である．図 3.5 (b) は同図 (a) に比べて，エッジがきれいに表現されていることがわかる．

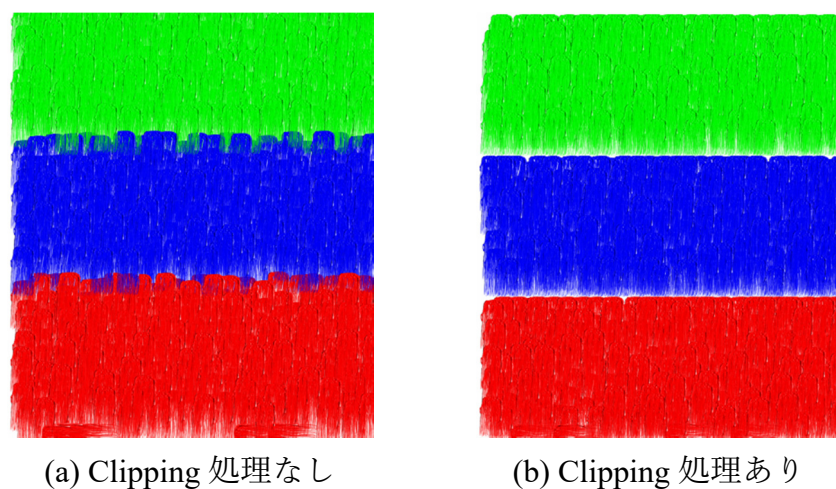


図 3.5 Clipping 処理の有無の比較

Fig. 3.5 Comparison of the presence or absence of clipping processing

3.2.6 モデリングのまとめ

表 3.1 に各画風の，テクスチャの配置，属性 (大きさ，向き，色)，描画順序の決定の方法についてまとめる．また，表 3.2 に SPDS 法のパラメータと生成結果におよぼす影響との関係を示す．このように，提案手法は，ユーザがパラメータの値を対話的に変更することで，バリエーションに富んだ絵画風画像を生成することが可能となる．

表 3.1 テクスチャの配置, 属性, 描画順序

Table 3.1 Distribution, attribution, and rendering order of the texture

	配置, 順序	大きさ	向き	色
貼り絵	SPDS 法	$w = 2r$ $l = 2r$	ランダム	入力画像の色
水彩画	SPDS 法	$w = 2r$ $l \geq 2r$ (Clipping により決定)	ETF	入力画像の色
油絵	SPDS 法	$w = 2r$ $l \geq 2r$ (Clipping により決定)	ETF	入力画像の色

表 3.2 SPDS 法のパラメータが生成結果におよぼす影響の関係

Fig. 3.2 Relationship between parameters of SPDS method and effects on generation results

パラメータ	意味	結果に与える影響
α	重なるの許容係数	テクスチャの重なり
r_{max}	円の半径の最大値	テクスチャの最大の大きさ
r_{min}	円の半径の最小	テクスチャの最小の大きさ
t	色差の閾値	入力画像のエッジ検出の度合い

3.3 レンダリング

モデリングにより, テクスチャを描画した結果に, 各絵画特有の効果を付加する. 例えば, 貼り絵ならば和紙などの質感, 水彩画ならば色のにじみ, 油絵ならば筆の質感などが挙げられる.

絵画特有の効果は, 以下の技術により実現される.

- (1) テクスチャの合成
- (2) アルファブレンディング
- (3) テクスチャのコントラスト変更

(1) テクスチャの合成

紙の質感や水彩絵具のむらやにじみなどを表現するために、それらの効果を模擬したテクスチャを、SPDS 法によるテクスチャの描画結果に合成する。合成はオーバーレイ合成、もしくは、乗算合成を用いる。

オーバーレイ合成は、合成する画像の明暗を強調して合成することができる。次式により、オーバーレイ合成を行う。

$$L_{result} = \begin{cases} 2L_{dest}L_{src} & \text{if } L_{dest} < 0.5 \\ 1 - 2(1 - L_{dest})(1 - L_{src}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで、 L_{result} は合成後の明度、 L_{dest} は合成前の画像の明度、 L_{src} は合成する画像の明度である。 L_{result} 、 L_{dest} 、 L_{src} の範囲はそれぞれ $[0, 1]$ である。入力画像の各画素の明度を式 (3.3) で得られた L_{result} に置き換えることで、入力画像の明暗を合成する画像の明暗に依存させることができる。

入力画像から抽出したエッジの合成には、乗算合成を用いる。乗算合成は式 (3.4) により実現する。

$$L_{result} = L_{dest}L_{src} \quad (3.4)$$

(2) アルファブレンディング

アルファブレンディングとは画像を透過させて合成する方法である。不透明度 100% で合成する画像そのままの状態であり、0% に近づくほど透明になる。テクスチャを描画する際にアルファブレンディング処理を行うことで、油絵具の厚みやかすれ、貼り絵の影を表現する。

(3) テクスチャのコントラスト変更

コントラストは画像の濃淡情報の分布の広さを表すものである。コントラストを変更することで、テクスチャの濃淡を変化させることができる。式 (3.5) により、画像のコントラストを変更する。

$$L_{result} = k(L_{input} - 0.5) + 0.5 \quad (3.5)$$

ここで、 L_{result} はコントラスト変更後の輝度値、 L_{input} は入力画像の輝度値、 k はパラメータであり k の値を変更することで画像のコントラストを変更する。 $k > 1$ の場合はコントラストが強くなり、 $k < 1$ の場合コントラストが弱くなる。

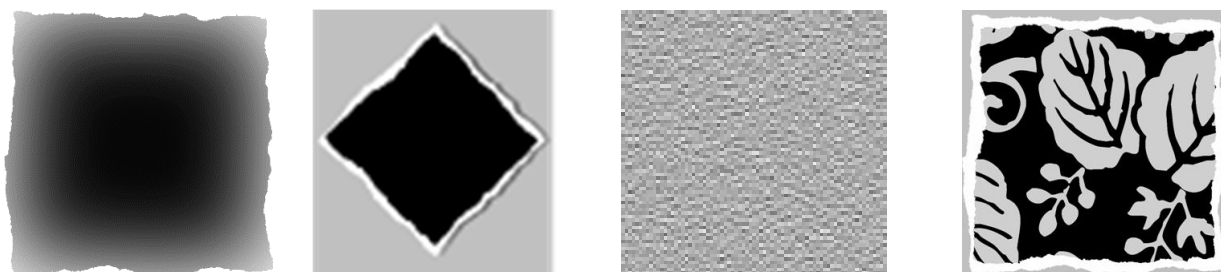
次項以降、各絵画の特徴とその実現方法について説明する。

3.3.1 貼り絵の特徴

貼り絵特有の効果や表現として、色紙片の厚みや重なりにより生じる影、紙の質感、模様紙が挙げられる。

影を表現するために用意したテクスチャ画像 (図 3.6 (a)) を、光源の位置に応じて平行移動することによって、色紙の厚みによって生じる影の効果を表現する。また、ノイズテクスチャ (図 3.6 (c)) を式 (3.3) によりオーバーレイ合成して、むらのある紙の質感を表現する。パターン画像 [54] を利用することにより、千代紙のような模様紙による貼り絵表現も可能となる。

以下に、詳細を述べる。



(a) 影のテクスチャ (b) 影の描画例 (c) ノイズテクスチャ (d) 模様テクスチャ

図 3.6 貼り絵の特徴の表現

Fig.3.6 Representation of characteristics of colored paper mosaic

(1) 影の表現

実際の貼り絵の作品をみると、色紙片の厚みや重なりにより影が生じていることがわかる。ここでは、色紙片の厚みや重なりによって生じる影を生成し、貼り絵の特徴を表現する。

色紙を 3 次元物体と考え、Z-buffer Shadowing などにより付影処理を行ったのでは、

処理コストが高くなってしまふ。そこで、色紙片はほぼ平面であること、その周辺部がわずかに重なり合って影が生じていることに着目して、次のような近似手法を提案する。

光源は左斜め下、左斜め上、右斜め下、右斜め上、上、下、左、右の8方向のみから照射するものとする。そのため、色紙片の4辺のうちの隣接したいずれか2辺、または、1辺に影ができる。影ができる辺の組み合わせは(右, 上), (右, 下), (左, 上), (左, 下)の4つに上下左右を足した8つのいずれかである。

次に、色紙用テクスチャ画像と同じ形状をした影用テクスチャ画像(図 3.6 (a))を用意し、これを図 3.3 (a) の千切った色紙用テクスチャ画像の下に配置する。色紙用テクスチャの縁は千切られたことにより、紙の厚みが薄くなっている。色紙の紙の厚さによって生じる影の濃淡を表現するため、図 3.6 (a) に示したように、影用テクスチャの縁に行くほど、アルファブレンディングの不透明度が低くなるようにしている。なお、影用テクスチャの外側の不透明度は0%である。

前述のように色紙用テクスチャ画像はランダムに回転された後、配置される。影用テクスチャ画像も同じ角度回転した後、光源の位置に応じて影ができる方向に平行移動することにより、影を生成する。提案手法による影の生成例を図 3.6 (b) に示す。

(2) むらのある紙の質感の表現

紙の種類によっては、折り紙のような色が一樣なものや、和紙のような紙の色にむらがあるものもある。ここでは、むらのある紙の質感を表現するために、提案手法により生成した貼り絵風画像に、図 3.6 (c) のノイズテクスチャをオーバーレイ合成することで、紙の質感を表現する。

(3) 模様紙の表現

実際の貼り絵では、千代紙などの模様の入った紙(模様紙)を千切って貼ることがある。ここでは、パターン画像を用いて模様紙による貼り絵を表現する。市販されている素材[54]を使用して、模様のある色紙片のテクスチャを生成する。

まず、パターン画像を色紙片の形に切り取る(図 3.6 (d))。切り取る部分はランダムにした方が望ましいがここでは簡単のため、同じものを用いる。

次に、切り取った画像を入力画像の色で塗りつぶすが、図 3.6 (d) のグレースケール画像の明度に応じて、入力画像の色の明度を変更する。パターン画像の各領域の色が同一色相になり、入力画像の色との差が少なくなるのでこの方法を採用した。

3.3.2 水彩画の特徴

水彩画の特徴には、絵具のにじみやむら (図 3.7 (a)), 画用紙の凹凸感 (図 3.7 (b)), 鉛筆による下書き (図 3.7 (c)) などがある [55]。これらをテクスチャ合成処理により表現する。



(a) 絵具のむらとにじみ

(b) 画用紙の凹凸

(c) 下書きの線

図 3.7 水彩画の特徴

Fig.3.7 Characteristics of watercolor

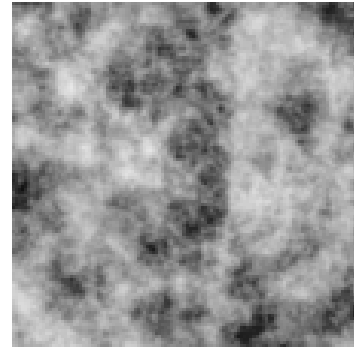
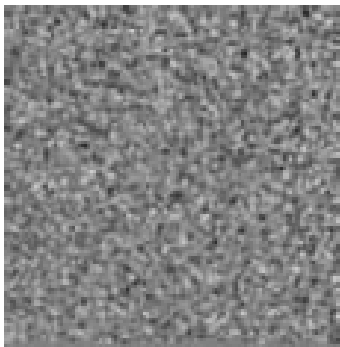
まず、画用紙の凹凸を表現するために、図 3.8 (a) のように濃淡の違いが細かく分かれている画像をオーバーレイ合成する。画用紙の凹凸を表現したテクスチャをそのままオーバーレイ合成すると、明暗が強調されすぎてしまう。この問題を解決するために、アルファブレンディングを用いる。

次に、色のにじみや色むらを表現するために、図 3.8 (b) のテクスチャを、アルファブレンディングを用いて、式 (3.3) によりオーバーレイ合成する。色のにじみや色むらを図 3.8 (b) のような、徐々に濃淡が変化する画像で表現した。なお、にじみを表現するテクスチャは Perlin Noise [30] を用いて生成した。Perlin Noise を用いることにより、異なった空間周波数のノイズテクスチャを生成することができるので、にじみの度合いを変更することが可能となる。

最後に、鉛筆の下書きの跡を表現するために、ラプラシアンフィルタを用いて入力

画像からエッジを抽出し，抽出したエッジを式 (3.4) により乗算合成する．ラプラシアンフィルタは2次微分フィルタなので，方向に依存しないエッジを得ることができる．

アルファブレンディングの際に，不透明度を調節することで，画用紙の凸凹，色むら，エッジの出具合を変化させることができる．



(a) 画用紙の凸凹感を表現したテクスチャ (b) 色のにじみやむらを表現したテクスチャ

図 3.8 水彩画の特徴を表現したテクスチャ

Fig.3.8 Noise textures for watercolor rendering

3.3.3 油絵の特徴

油絵は油絵具などを用いて描かれる絵画の1つである．油絵特有の効果や表現として次の3つの挙げられる．

- (1) 絵具を延ばすと徐々に絵具が薄くなり，かすれが生じる (図 3.9).
- (2) 最初にキャンバスに塗った絵具はあまりかすれず，すでに塗られた絵具の上に，新たな絵具を塗り重ねる際，かすれが生じ，下層の絵具が覗き見える (図 3.10).
- (3) 絵具の厚みによって絵の印象が大きく異なる (図 3.11).

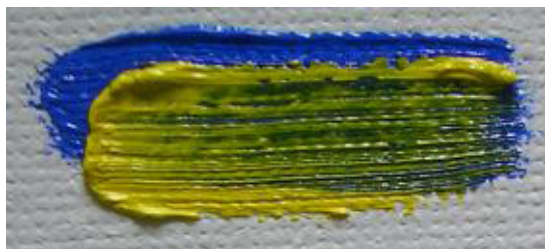
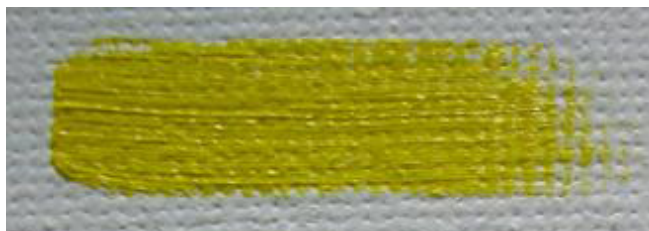


図 3.9 絵具のかすれ
Fig.3.9 Smearing exemplar



図 3.10 ストロークの重なり
Fig.3.10 Overlapping strokes



(a) ストローク (薄)



(b) ストローク (中)



(c) ストローク (厚)

図 3.11 ストロークの厚さの違い
Fig.3.11 Difference of the stroke thickness

(1) かすれの表現

絵筆テクスチャは実際の油絵具のストロークを用いる．実際の油絵具をアクリル板に延ばし，スキャナで取り込み，グレースケール画像に変換した (図 3.12 (a))．実際のストロークに着目すると，塗り始めは絵具が厚く塗られ，徐々にかすれていく．また，すでに描いた絵具の上から，新たに絵具を塗り重ねると，絵具がかすれ，下層の絵具の色が覗き見える．その効果を表現するために，図 3.12 (a) を加工し，筆の流れに沿って，徐々に不透明度が低くなるよう調整した．また，絵具のかすれを表現するために，図 3.12 (b) に示すように，筆の流れに沿って隙間を作ることで，下層のテクスチャの色が覗き見えるよう工夫した．図 3.13 (a) に図 3.12 (a) の絵筆テクスチャを用いて描画した例を，図 3.13 (b) に図 3.12 (b) の絵筆テクスチャを用いて描画した例を示す．図 3.13 (b) の方が，同図 (a) と比較して，前述した油絵の特徴が表現できていることがわかる．

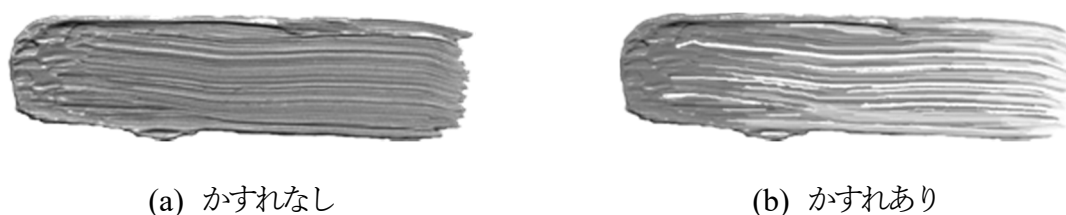


図 3.12 絵筆テクスチャ

Fig.3.12 Brush stroke texture

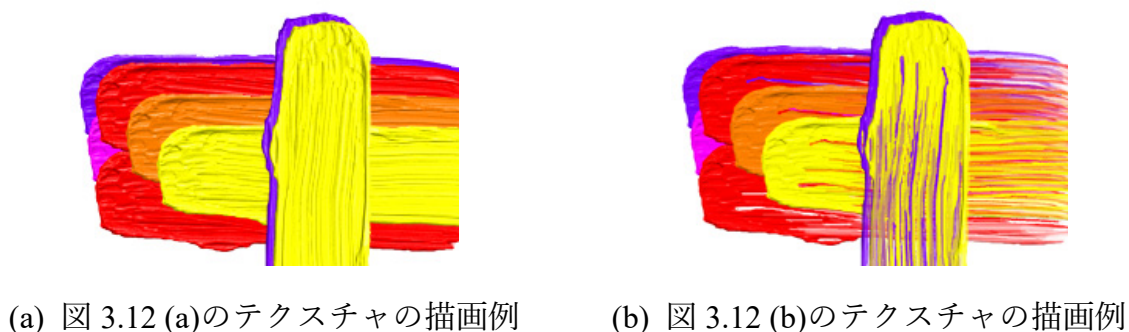


図 3.13 絵筆テクスチャの描画例

Fig.3.13 Rendering results of brush strokes

(2) 重なるの表現

実際の油絵では、最初に塗った絵具はかすれず、すでに塗られた絵具の上に、新たな絵具を塗り重ねる際に、絵具が混ざり合い、かすれが生じる。これを表現するために、キャンバスにストロークが直接描画される場合は隙間とアルファブレンディング処理がない、かすれなしの絵筆テクスチャ (図 3.12 (a)) を使用し、すでに配置されたテクスチャと重なりを持って描画される場合はかすれありの絵筆テクスチャ (図 3.12 (b)) を使用する。

(3) 厚みの表現

絵具の厚みによって、絵の印象が大きく変わる。絵筆テクスチャの明度のコントラストを変更することで、絵具の厚みの違いを表現する。図 3.14 (a) と同図 (b) は、図 3.12 (b) の絵筆テクスチャのコントラストを式 (3.5) により変更したテクスチャである。低コントラストのテクスチャ (図 3.14 (a)) を用いることで、絵具を薄く延ばしたような表現を、高コントラストのテクスチャ (図 3.14 (b)) を用いることで、絵具を厚く塗ったような表現を実現する。



図 3.14 絵具の厚みの表現

Fig.3.14 Representation of paint thickness

3.3.4 レンダリングのまとめ

レンダリングプロセスでは、各絵画の特徴を再現する方法について述べた。モデリングプロセスにより決定した位置に、各画風に応じた処理を施したテクスチャを描画する。テクスチャの合成、アルファブレンディング、テクスチャのコントラスト変更などの処理により、各種効果を実現した。各技法と絵画の特徴の表現との関係を表 3.3 にまとめる。

表 3.3 各技法と絵画の特徴表現との関係

Table 3.3 Relationship between each technique and feature expression of painting

	テクスチャの合成	アルファブレンディング	コントラスト変更
貼り絵	紙の質感	影の表現	
水彩画	画用紙の質感	画用紙の質感	
	絵具のにじみとむら	絵具のにじみとむら	
	下書きの線	下書きの線	
油絵		絵具のかすれの表現	絵具の厚みの表現

3.4 実験結果

提案手法の有効性を検証するために、貼り絵、水彩画、油絵の各絵画風画像の生成実験を行った。また、各パラメータと生成結果との関係を検証した。さらに、生成処理に関わるパラメータと生成時間との関係について調べた。

3.4.1 絵画風画像生成結果

入力画像から、絵画風画像の生成実験を行った。絵画風画像の生成例を図 3.16 ～ 18 に示す。図 3.15 は入力画像、図 3.16 は貼り絵風画像、図 3.17 は水彩画風画像、図 3.18 は油絵風画像の生成例である。このように、提案手法では、同じ枠組みを利用して様々な絵画風画像を生成することが可能である。提案手法では、色の変化が一様な領域は大きいテクスチャで、色の変化が激しい領域は小さいテクスチャで描画されるので、入力画像の細部を表現することができる。



図 3.15 原画像

Fig.3.15 An input image

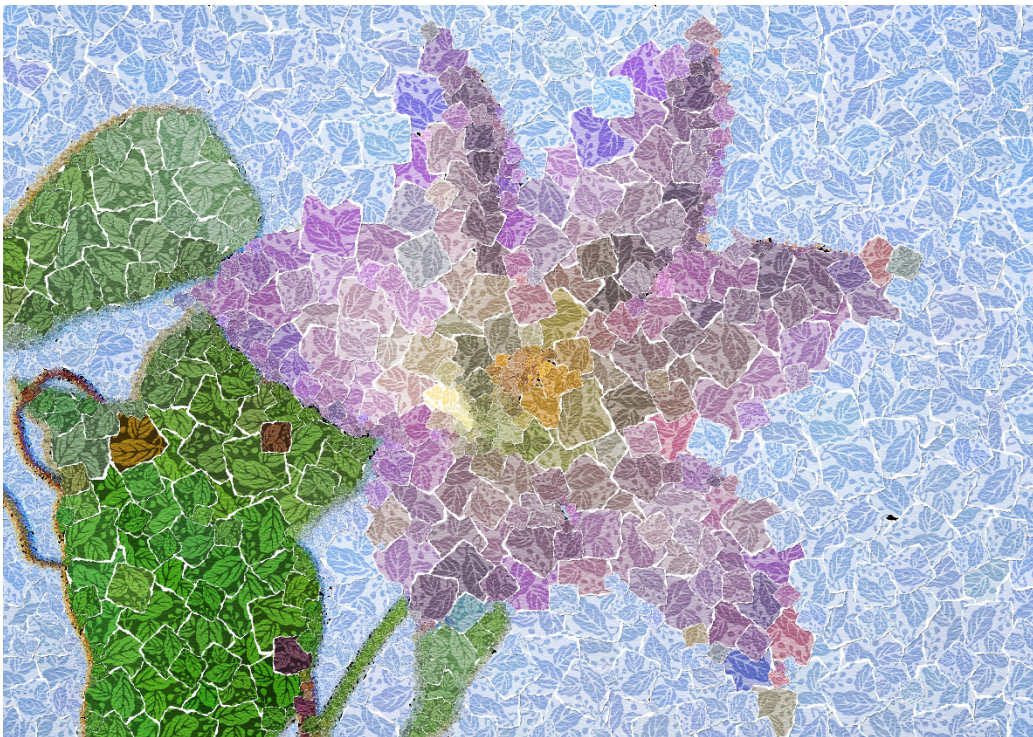


図 3.16 貼り絵風画像の生成例

Fig.3.16 An example of colored paper mosaic like image



図 3.17 水彩画風画像の生成例

Fig.3.17 An example of watercolor like image



図 3.18 油絵風画像の生成例

Fig.3.18 An example of oil painting like image

3.4.2 パラメータが生成結果に与える影響

SPDS 法のパラメータを変更することで、様々なバリエーションの絵画風画像を生成することが可能である。

図 3.19 は貼り絵風画像を例として、パラメータを変更して生成した結果である。図 3.19 (b) と 同図 (c) は $\alpha=0.6$, $r_{min}=1$ とし, r_{max} による影響を見るために生成した画像の例である。図 3.19 (b) は $r_{max}=10$ として小さい色紙で貼った画像, 同図 (c) は $r_{max}=50$ として大きい色紙で貼った画像の例である。

次に, α が生成画像に及ぼす影響を調べるため, $r_{max}=30$, $r_{min}=1$ として, 図 3.19 (d) ~ (f) に示した貼り絵風画像を生成した。図 3.19 (d) は $\alpha=0.6$, 同図 (e) は $\alpha=0.8$, 同図 (f) は $\alpha=1.0$ で生成した画像である。図 3.19 (f) は隙間があるが, 一方, 同図 (d) は隙間なく色紙が敷き詰められていることが分かる。

このように提案手法では, パラメータを変更することで, 多彩なバリエーションの絵画風画像を生成することができるため, ユーザの好みに合った結果を得ることが可能である。また, 油絵は比較的ストロークを重ねて描き, 貼り絵は色紙をあまり重ねない傾向にあるので, パラメータの変更によるテクスチャの配置間隔の制御は各絵画の特徴を表現する上でも有効であると考えられる。

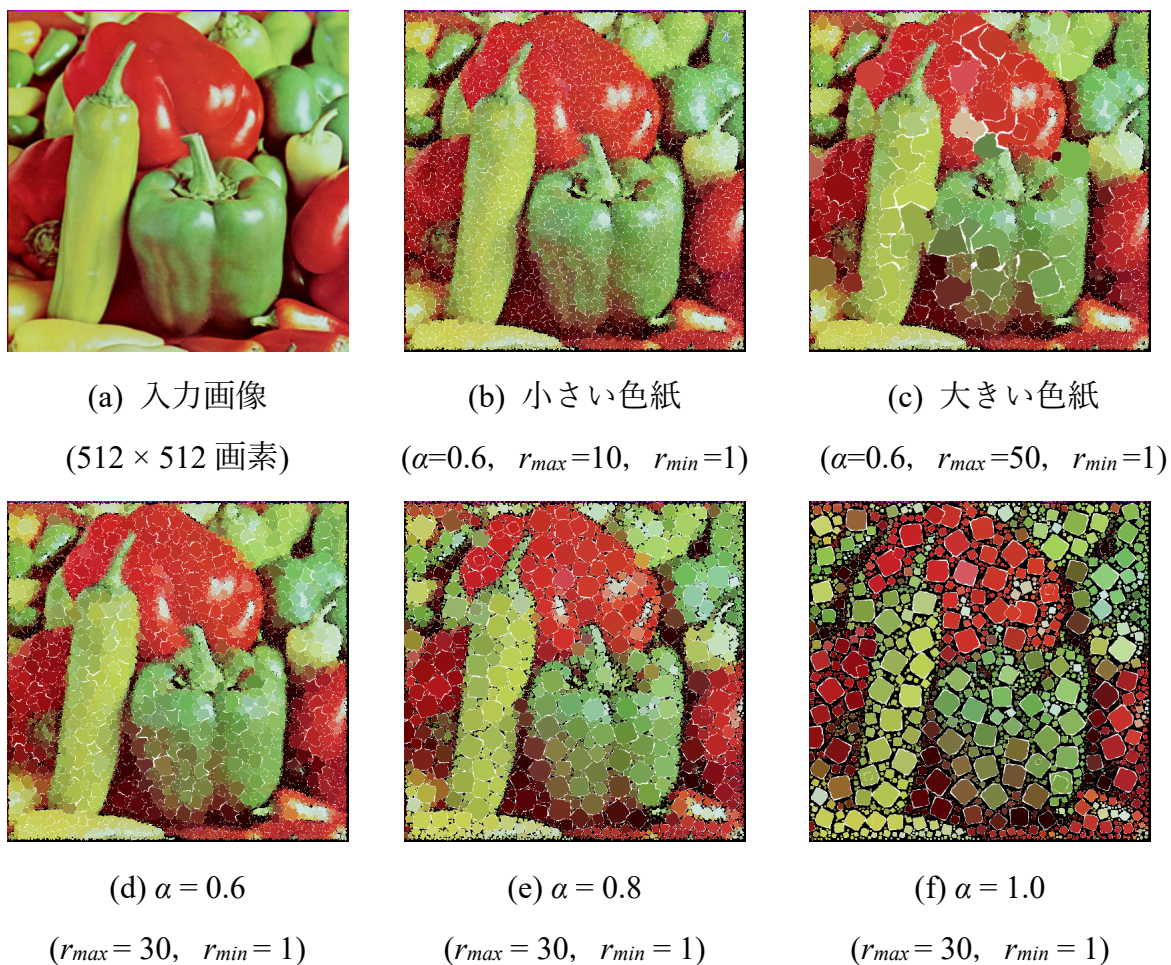


図 3.19 パラメータを変更した貼り絵風画像の生成例

Fig.3.19 Examples of color paper mosaic like images generated with various parameters

3.4.3 貼り絵風画像の生成例

図 3.20, 図 3.21, 図 3.22 に貼り絵風画像の生成例を示す. 図 3.22 に各種効果を組み合わせた貼り絵風画像の生成例を示す. 図 3.22 (a) は入力画像である. 図 3.22 (b) は色紙片の重なりによって生じる影の効果を表現した貼り絵風画像の生成例である. 図 3.22 (c) は, 紙の質感を表現した貼り絵風画像の生成例である. 図 3.22 (d) は模様紙の表現効果を考慮して生成した貼り絵風画像の例である. 図 3.22 (e) はこれら 3 つの効果を組み合わせた例である.

このように, 提案手法ではユーザの好みに合わせて, 本論文で提案した 3 つの効果を任意に組み合わせて, 多彩な貼り絵風画像生成を可能としている.

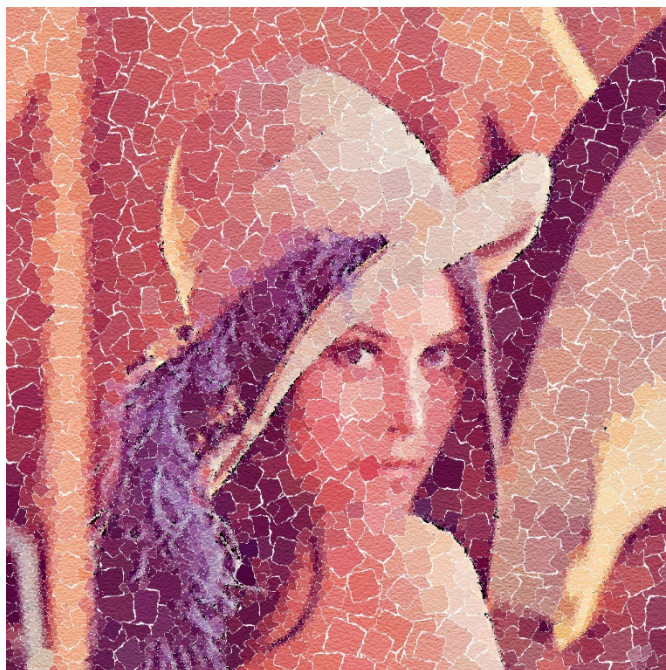


図 3.20 貼り絵風画像生成例 (Lenna)

Fig.3.20 An example of color paper mosaic like image (Lenna)

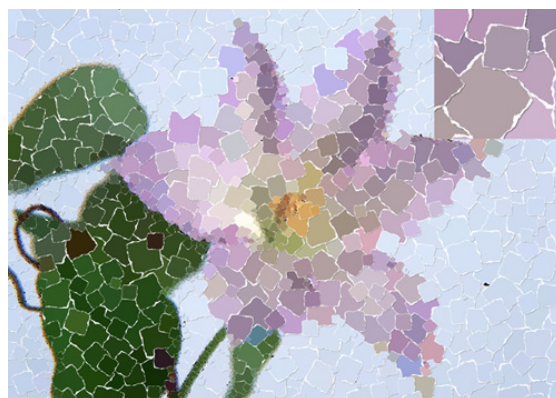


図 3.21 貼り絵風画像生成例 (Flower)

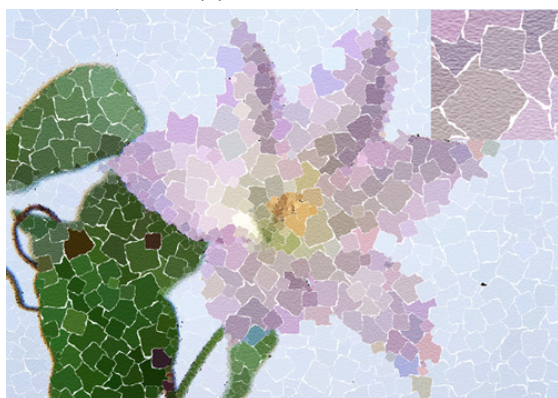
Fig.3.21 An example of color paper mosaic like image (Flower)



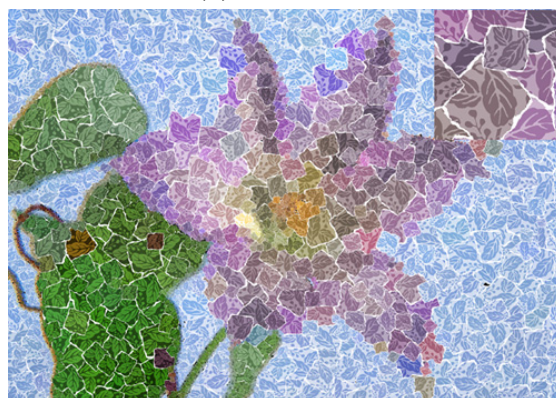
(a) 入力画像



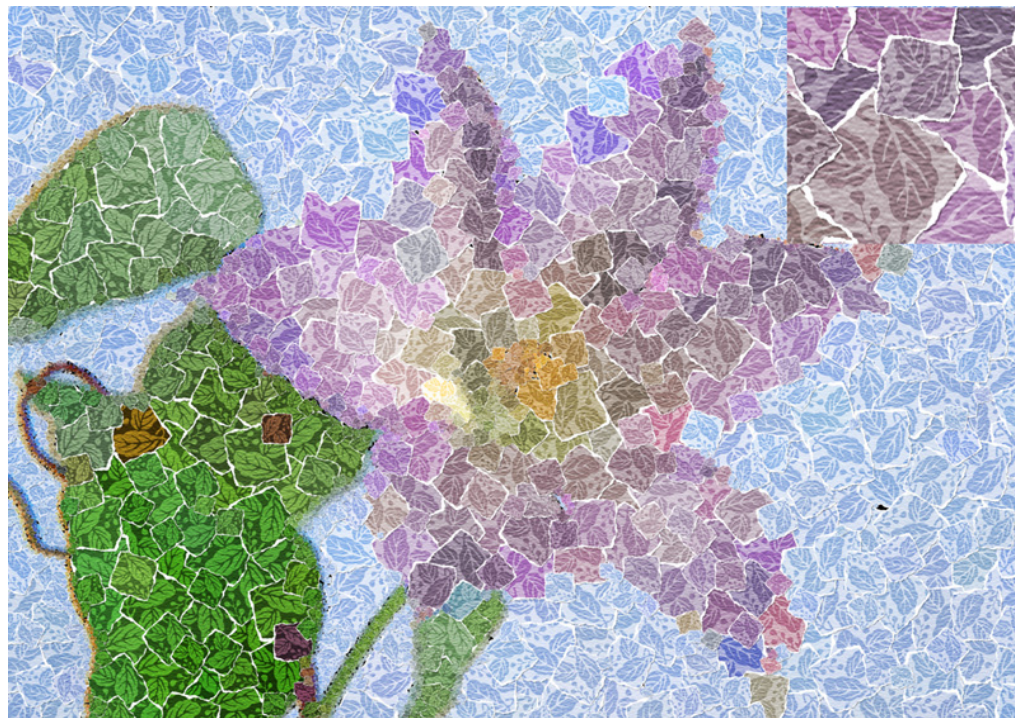
(b) 影の効果



(c) 紙の質感の効果



(d) 模様紙の効果



(e) 3つの効果を組み合わせた貼り絵風画像

図 3.22 各種効果を組み合わせた貼り絵風画像生成例

Fig.3.22 An example of color paper mosaic like image with various effects

3.4.4 水彩画風画像の生成例

水彩画風画像の生成例を図 3.23, 図 3.24 に示す.

図 3.24 (a) は SPDS 法に基づいてストロークを描画した結果である. 図 3.24 (b) は同図 (a) の画像に, 図 3.8 (a) のテクスチャを不透明度 50%でオーバーレイ合成した結果である. オーバーレイ合成により, 画用紙の凸凹感が表現されていることが分かる.

図 3.24 (c) は同図 (a) の画像に図 3.8 (b) のテクスチャを不透明度 50%でオーバーレイ合成した結果である. 図 3.8 (a) のテクスチャとは違いグラデーションがかかっているため, 徐々に明暗が変化しており, 色のにじみやむらが表現できていることがわかる.

図 3.24 (d) は入力画像からラプラシアンフィルタを用いて抽出したエッジを, 不透明度 50%で乗算合成した結果である. 図 3.24 (a) ~ (c) までの結果はぼやけた印象になっていたが, 輪郭がはっきりし, 鉛筆による下書きの効果を表現することができた.

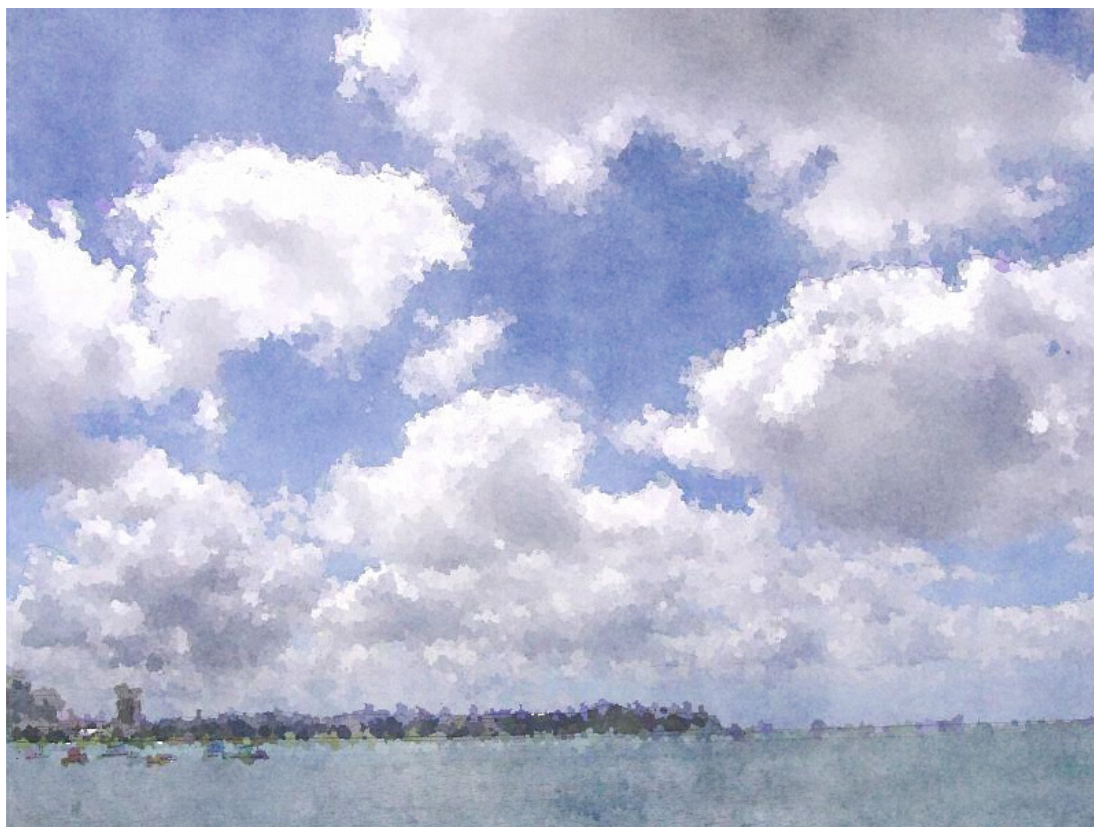


図 3.23 水彩画風画像生成例 (空と雲)

Fig.3.23 An example of water color like image (Sky and cloud)



(a) テクスチャ描画結果



(b) 画用紙の凹凸感処理



(c) 絵具のにじみ感処理



(d) エッジ描画



(e) 水彩画風画像

図 3.24 水彩画風画像生成処理

Fig.3.24 Generation process of the water color like image

3.4.5 油絵風画像の生成例

図 3.25, 図 3.26, 図 3.27 に油絵風画像の生成例を示す. 絵筆テクスチャが重なって描画されている部分に注目すると, 絵筆テクスチャを加工したことにより, 油絵具特有の色の混合が表現できていることが分かる.

図 3.26 (c) は同図 (a) の入力画像から生成した油絵風画像である. 図 3.26 (b) は同図 (c) の一部を拡大した画像である. 拡大部を見るとひまわりの花びらに沿ってテクスチャが描画されていることが分かる. これは, ETF によりテクスチャのエッジに沿って描画した効果である.

図 3.27 は, 絵具の厚みの違いを検証するため, 絵筆テクスチャのコントラストを変更して生成した結果である. 図 3.27 (b) は, 図 3.12 (b) のテクスチャを用いて生成した油絵風画像の例である. 図 3.27 (c) は図 3.14 (a), 図 3.27 (d) は図 3.14 (b) と同様のコントラスト値の 2 種の絵筆テクスチャを使用して生成した結果である. 低コントラストのテクスチャを用いた図 3.27 (c) は, 同図 (b) に比べ, 絵筆テクスチャの凹凸の変化が少ないため絵具を薄く延ばしたような印象になる. 一方, 高コントラストのテクスチャを用いた図 3.27 (d) は, 絵筆テクスチャの凹凸が目立ち, 絵具を厚く塗ったような表現になっていることが分かる.

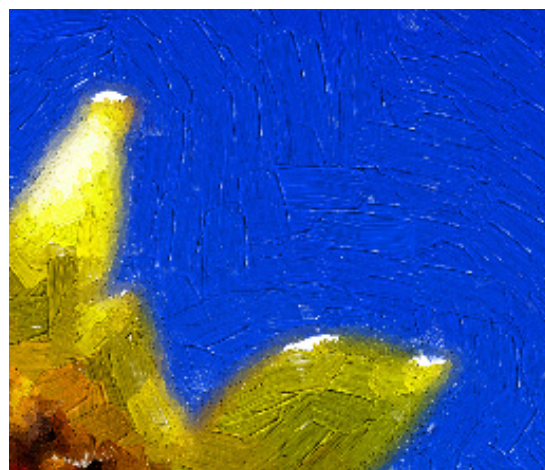


図 3.25 油絵風画像生成例

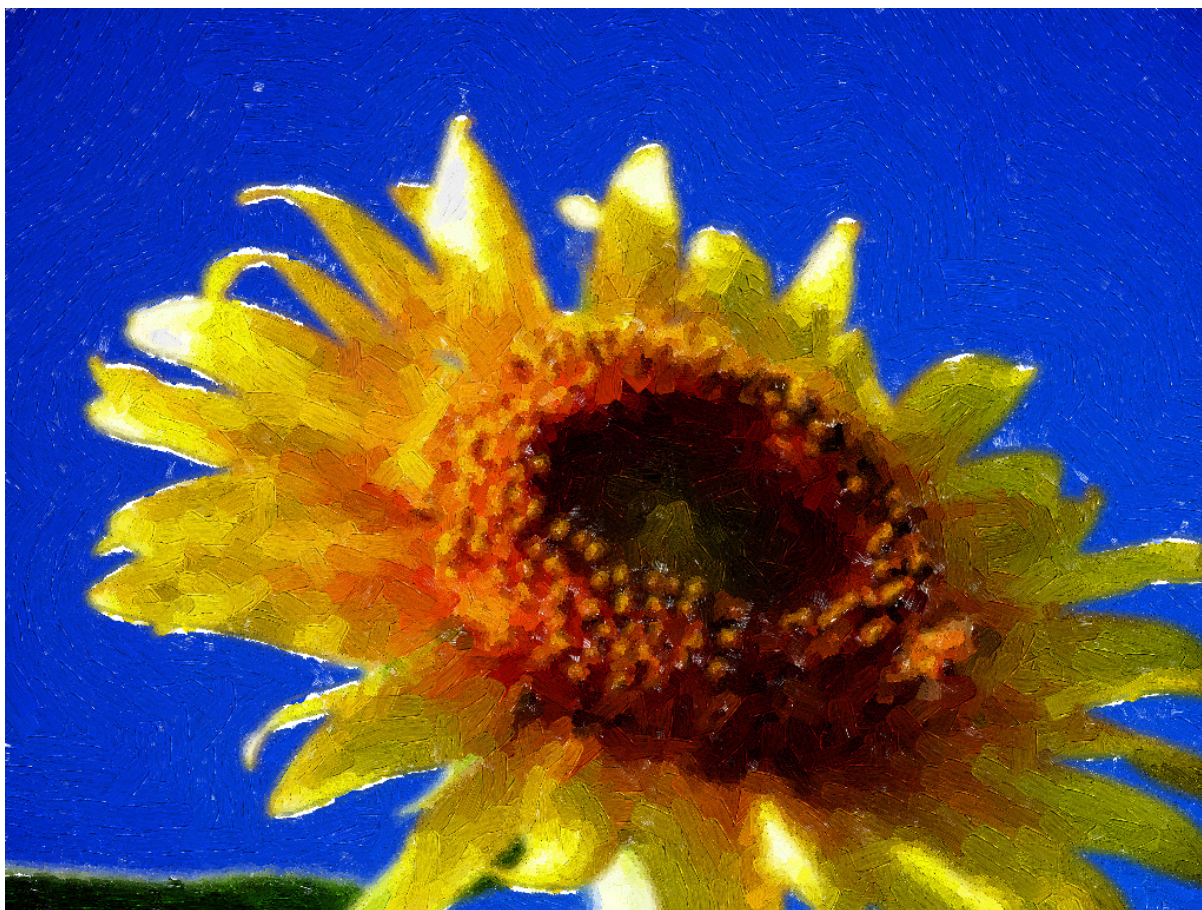
Fig.3.25 An example of oil painting like image



(a) 入力画像



(b) (c)の拡大図



(c) 油絵風画像生成例

図 3.26 ETF の効果

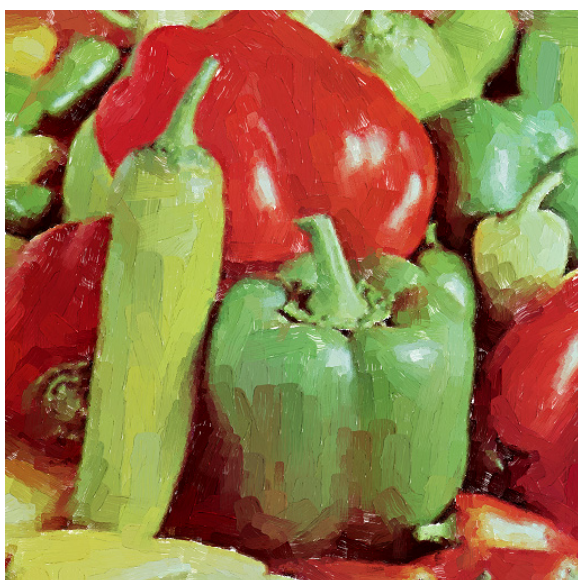
Fig.26 Effects of the ETF



(a) 入力画像



(b) 中コントラスト



(c) 低コントラスト



(d) 高コントラスト

図 3.27 コントラストを変更して生成した油絵風画像の例

Fig.3.27 Examples of oil pointing like image generated with differnt contrast

3.4.6 パラメータと生成時間の関係

ここでは、貼り絵風画像を例として、生成処理に関わるパラメータと生成時間との関係を調べる．入力画像には Lenna (図 3.28) を使用した．視覚効果に影響のあるパラメータである，円の許容係数 α ，画素数，円の最大値 r_{max} ，色差の閾値 t を検証の対象

とした．この実験で使用した PC の CPU は Pentium 4 (3GHz)，メモリ 2GB である．

SPDS 法のパラメータと生成時間との関係は，貼り絵以外の絵画風画像でも同様の傾向がある．

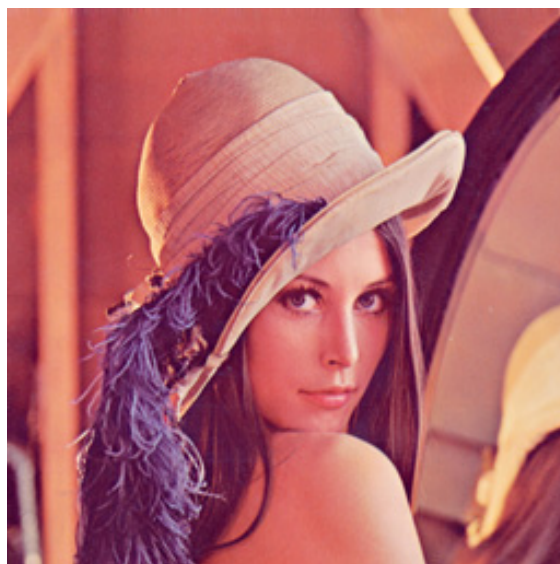


図 3.28 画像 Lenna

Fig.3.28 An input image (Lenna)

3.4.6.1 重なるの許容係数 α と生成時間との関係

重なりを許容するパラメータ α を 0.1 ～ 1.0 まで 0.1 刻みに変えたときの生成時間を図 3.29 に示す．このとき，入力画像を 256×256 画素に， $r_{max}=20$ ， $r_{min} = 1$ ， $\angle r = 1$ ， $t = 160$ ， $n = 500$ に固定した．

(1) 大きい円に内包される小さい円を配置する場合

図 3.29 の破線は $d_{ij} < r_i$ となる場合は円を配置しないという条件を入れなかった場合の結果である． $\alpha=0.1$ の場合は円の重なりが大きくなるため，描画されるテクスチャの数が多くなる．したがって，生成時間が長くなる． α の値が 1 に近づくにつれて円の重なりが小さくなるので，描画されるテクスチャの枚は減少する．その結果，生成時間は短くなる傾向にある．

(2) 大きい円に内包される小さい円を配置しない場合

図 3.29 の実線は $d_{ij} < r_i$ となる場合は円を配置しないという条件 (図 3.2 (c)) を入れた場合の結果である. この処理を追加した結果, $\alpha = 0.1$ から $\alpha = 0.5$ までの間の生成時間は, 約 3000 秒から 10 秒以下まで短縮され, 高速化が実現された. また, この条件の追加により, テクスチャの中にテクスチャが内包されるために見苦しくなる状態を回避することができる.

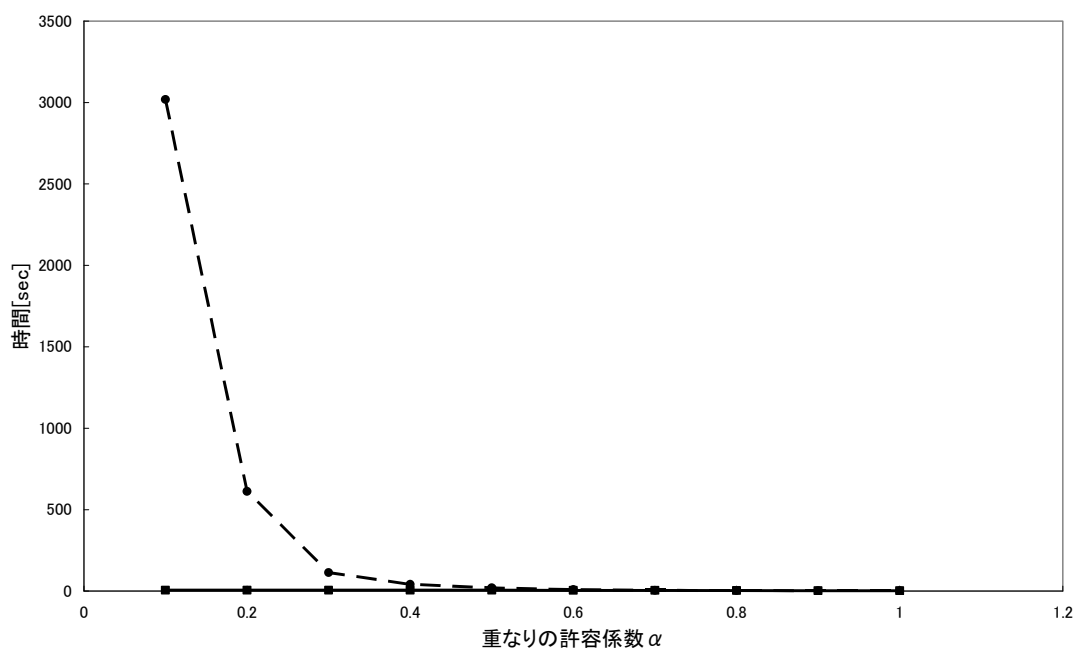


図 3.29 重なりの許容係数 α と生成時間の関係

Fig. 3.29 The relationship between coefficient α allowing overlapping and generation time

3.4.6.2 画素数と生成時間との関係

入力画像の画素数を 256×256 画素, 512×512 画素, 768×768 画素, 1024×1024 画素と変えたときの生成時間を図 3.30 に示す. このとき, $\alpha = 0.8$, $r_{max} = 20$, $r_{min} = 1$, $\angle r = 1$, $t = 160$, $n = 500$ に固定した. 図 3.30 から, 画素数の増加に伴い, 生成時間も増加することがわかる.

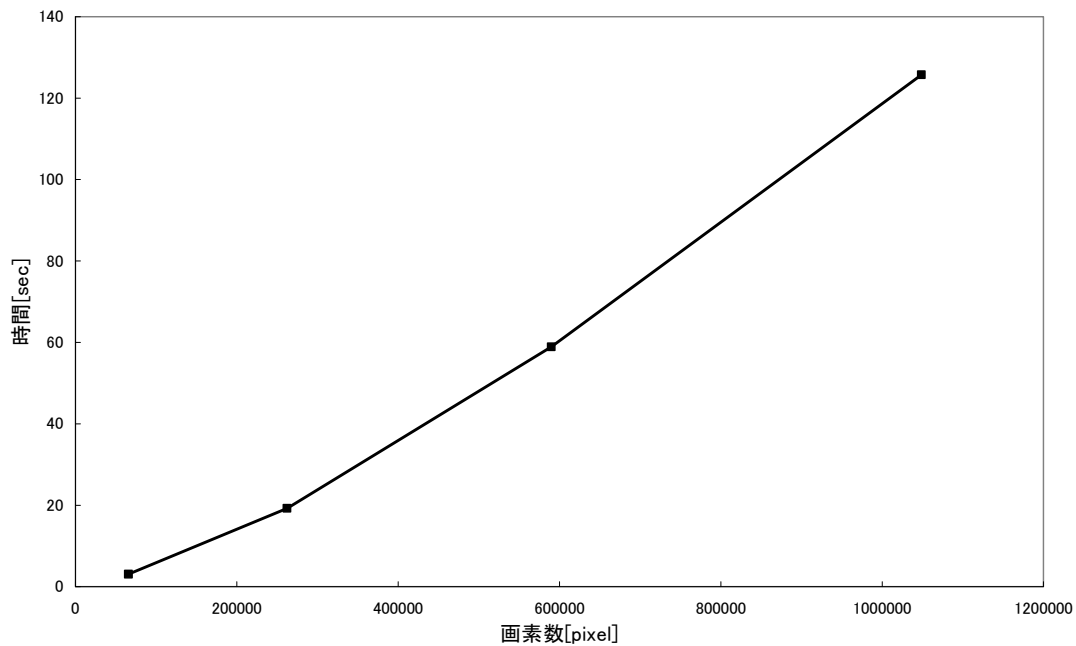


図 3.30 画素数と生成時間の関係

Fig. 3.30 The relationship between a number of pixels and generation time

3.4.6.3 半径の最大値 r_{max} と生成時間との関係

SPDS 法の円の半径の最大値 r_{max} を 5, 10, 以下 10 ずつ大きくして 100 まで変えたときの生成時間を図 3.31 に示す. このとき, 入力画像を 256×256 画素, $\alpha = 0.8$, $r_{min} = 1$, $\angle r = 1$, $t = 160$, $n = 500$ に固定した. 図 3.31 から両者は反比例の関係にあることがわかる. これは, r_{max} が大きいほど描画されるテクスチャの数が少なくなるため, 生成時間が短くなると考えられる.

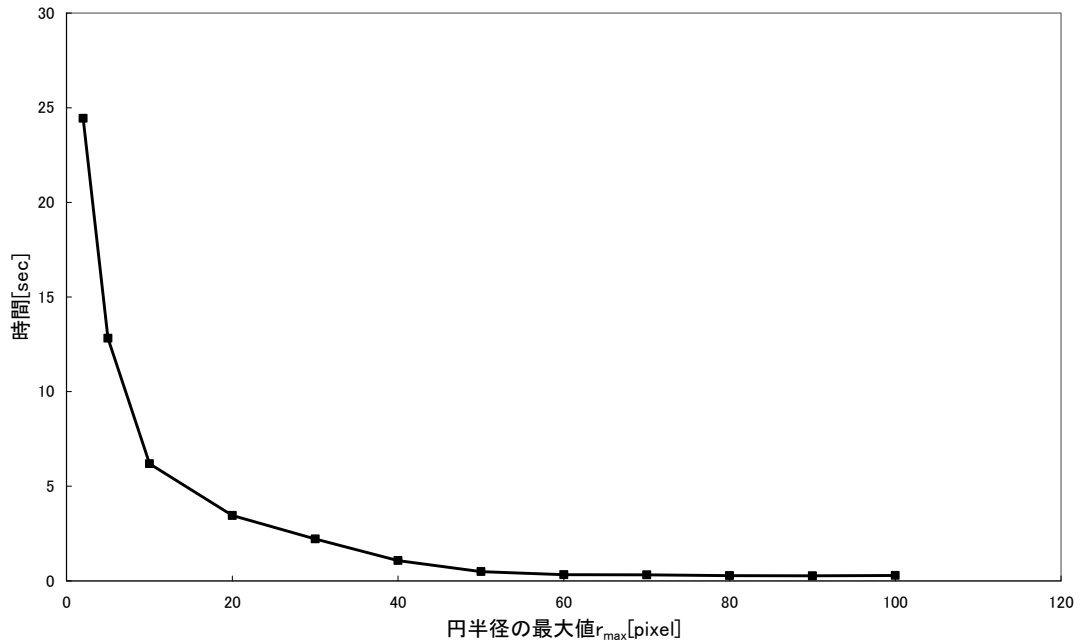


図 3.31 円の半径の最大値 r_{max} と生成時間の関係

Fig. 3.31 The relationship between a maximum value of circle radius and generation time

3.4.6.4 色差の閾値 t と生成時間の関係

色差の閾値 t を 1, 10, 50, 100, 以下 100 ずつ大きくして 800 まで変えたときの生成時間を図 3.32 に示す. このとき, 入力画像を 256×256 画素, $\alpha = 0.8$, $r_{max} = 20$, $r_{min} = 1$, $\Delta r = 1$, $n = 500$ に固定した. t が 1 のときは, 少しの色差でも円を配置不可能としているため, ほとんど円を配置することができず, 生成時間が短くなる. t が大きくなるにつれて, 円を配置できる領域が増えていくが, $t = 50$ までは, 円を配置できる領域が少なく, 小さい円を多数配置することになるため, 生成時間が増加する. $t = 50$ 以降は, 色差が大きい領域にも円を配置することができるようになるため, 生成時間が短くなると考えられる.

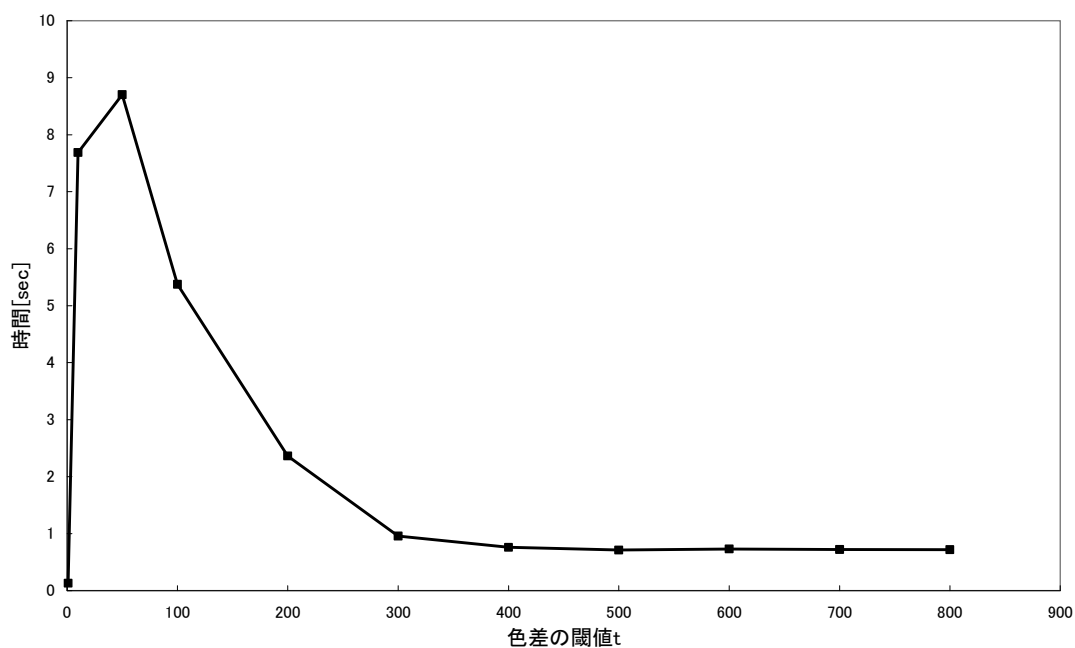


図 3.32 閾値 t と生成時間の関係

Fig.3.32 The relationship between a threshold t and generation time

3.5 まとめ

Scalable Poisson Disk Sampling 法に基づいて、2次元の入力画像から様々な画風の絵画風画像を自動生成する手法を提案した。提案手法は (1) モデリングと (2) レンダリングの2段階からなり、モデリングにより、テクスチャを描画する位置とその属性 (色, 大きさ, 向き), 描画順序を決定し、レンダリングにより、各絵画特有の効果を付加して描画することにより、様々な画風を再現した。以下に、モデリングとレンダリングについてまとめる。

(1) モデリング

テクスチャの配置, 属性 (大きさ, 向き, 色), 描画順序を決定する。テクスチャの配置, 大きさ, 描画順序は SPDS 法により決定され, 向きと色は入力画像との関係により決定される。

(2) レンダリング

モデリングにより描画する位置が決定されたテクスチャを画風に応じて処理し、各画風に応じた効果を付加し描画することで様々な画風の絵画風画像を生成する。

各画風を再現するために、テクスチャの合成、アルファブレンディング、テクスチャのコントラスト変更の各技術を用いた。

提案手法の有効性を検証するために、絵画風画像の生成実験を行った。ここでは、SPDS 法のパラメータが生成結果に及ぼす影響についても検証した。さらに、各パラメータと生成時間との関係についても実験により検証を行った。

第4章

RYB カラーモデルとその応用

4.1 はじめに

絵の具の混色は多くの人が幼少期より慣れ親しんだ混色法である。多くの人が、複数の絵具をパレットやキャンバス上で混色し、新たな色を作り出した経験があるだろう。美術教育の分野では、Itten の RYB カラーモデル [22] が広く用いられている。RYB カラーモデルは、赤、黄、青を三原色とする減法混色モデルである。図 4.1 (a) は、RYB カラーモデルに基づく減法混色の例である。また、図 4.2 (a) は Itten の RYB 色相環である。図 4.1 (a) に示すように、赤と黄を混ぜるとオレンジに、黄と青を混ぜると緑に、青と赤を混ぜると紫になり、3 色が混ざるほど黒に近づく。

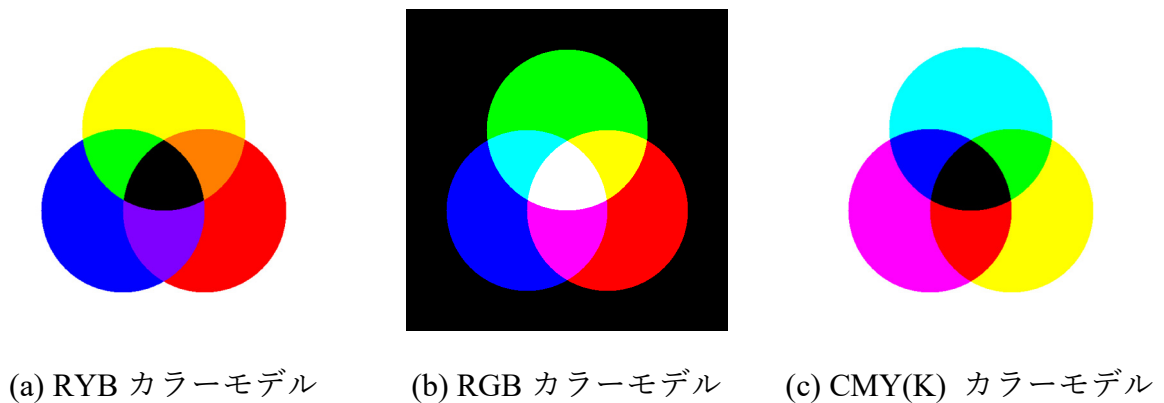


図 4.1 三原色に基づく混色

Fig. 4.1 Mixed color representations based on three primary colors



(a) Itten の RYB 色相環



(b) RGB (CMY (K)) 色相環 (RGB と CMY (K) は補色関係にある)

図 4.2 色相環

Fig. 4.2 Color Wheels

一方、ディスプレイは赤、緑、青を三原色として色を表示しているため、コンピュータアプリケーションでは RGB カラーモデル [51] が用いられる。図 4.1 (b) に示すように、RGB カラーモデルは赤、緑、青を三原色とする加法混色モデルである。RGB 色空間上での混色は加法混色であるため、絵具の混色と結果が異なる。そのため、RGB カラーモデルに慣れていない、絵の具の混色に慣れ親しんだユーザにとって、RGB 色空間での混色は、予測と結果が異なるため、しばしば混乱が生じる。この混乱は、CMY (K) カラーモデル [51] でも同様に生じる。CMY (K) はシアン、マゼンタ、黄を三原色とする減法混色モデルである (図 4.1 (c)). K はキープレートを表し、黒が用いられる場合が多い。図 4.2 (b) に示すように、CMY (K) モデルは RGB モデルと補色関係にある。すなわち、CMY (K) モデルは RGB モデルの混色ルールと近い関係にある。したがって、CMY (K) モデルも RGB モデルと同様に、絵の具の混色ルールに従わないという問題がある。

図 4.3 に、RYB, RGB, CMY (K) モデルに基づく混色結果の例を示す。色名の下に記述されている三原色の各値の範囲は $[0, 1]$ である。図 4.3 に示すように、RYB モデルでは黄と青を混ぜると緑になり、絵具の混色と一致する。しかしながら、RGB モデルでは、黄と青を混ぜると白になり、CMY (K) モデルでは黒になる。このように、RGB と CMY (K) の混色は、絵具の混色と異なる。

RYB	Yellow (0, 1, 0)	+	Blue (0, 0, 1)	=	Green (0, 1, 1)
RGB	Yellow (1, 1, 0)	+	Blue (0, 0, 1)	=	White (1, 1, 1)
CMY(K)	Yellow (0, 0, 1)	+	Blue (1, 1, 0)	=	Black (1, 1, 1)

図 4.3 RYB, RGB, CMY (K) モデルによる混色例

Fig. 4.3 Example of color mixing in RYB, RGB, and CMY (K) models

RGB や CMY (K) カラーモデルに慣れていない人にとっては、RYB カラーモデルは絵の具の混色に近いと、より直感的な混色を実現できると思われる。しかしながら、RGB 空間から RYB 空間への変換式はまだ提案されていない。RYB カラーモデルをコンピュータで利用できるようになれば、コンピュータグラフィックス、可視化、アート、デザイン、教育などの多くのコンピュータアプリケーションへの活用が期待できる。

本研究では、RGB 色空間から RYB 色空間への変換式、および、逆変換式を提案する。また、RYB カラーモデルを用いることで、アルファブレンディングなどの混色法が有効なことを示す。さらに、色指定のためのインタフェース、ブラシストロクロンダリング、多属性データの可視化への RYB カラーモデルの適用例を示す。実験により、RYB カラーモデルの有効性を示す。

4.2 RYB カラーモデル

本節では、RGB カラーモデルと RYB カラーモデルの違い、および、本研究で扱う RYB カラーモデルの定義について述べる。

4.2.1 RGB カラーモデル

RGB カラーモデルは、赤、緑、青を三原色とする加法混色モデルである [51]。RGB カラーモデルでは青、緑、青の 3 色を組み合わせることで色を表現する。赤と緑を混ぜると

黄に、緑と青を混ぜるとシアンに、青と赤を混ぜるとマゼンタになり、各色を混ぜれば混ぜるほど白に近づく。また、図 4.4 (a) に示すように、RGB 色空間は、赤、緑、青を軸とする立方体で表現される。立方体の角は赤、緑、青、シアン、マゼンタ、黄、白、黒の 8 色である。

4.2.2 RYB カラーモデル

RYB カラーモデルは赤、黄、青を三原色とする減法混色モデルである [22]。RYB カラーモデルでは、赤、黄、青の 3 色を組み合わせて色を表現する。赤と黄を混ぜるとオレンジ、黄と青を混ぜると緑、赤と青を混ぜると紫になる。各色を混ぜれば混ぜるほど黒に近づく。また、図 4.4 (b) に示すように、RYB 色空間は赤、黄、青を 3 軸とする立方体で表現される。立方体の角は赤、黄、青、オレンジ、緑、紫、黒、白の 8 色である。

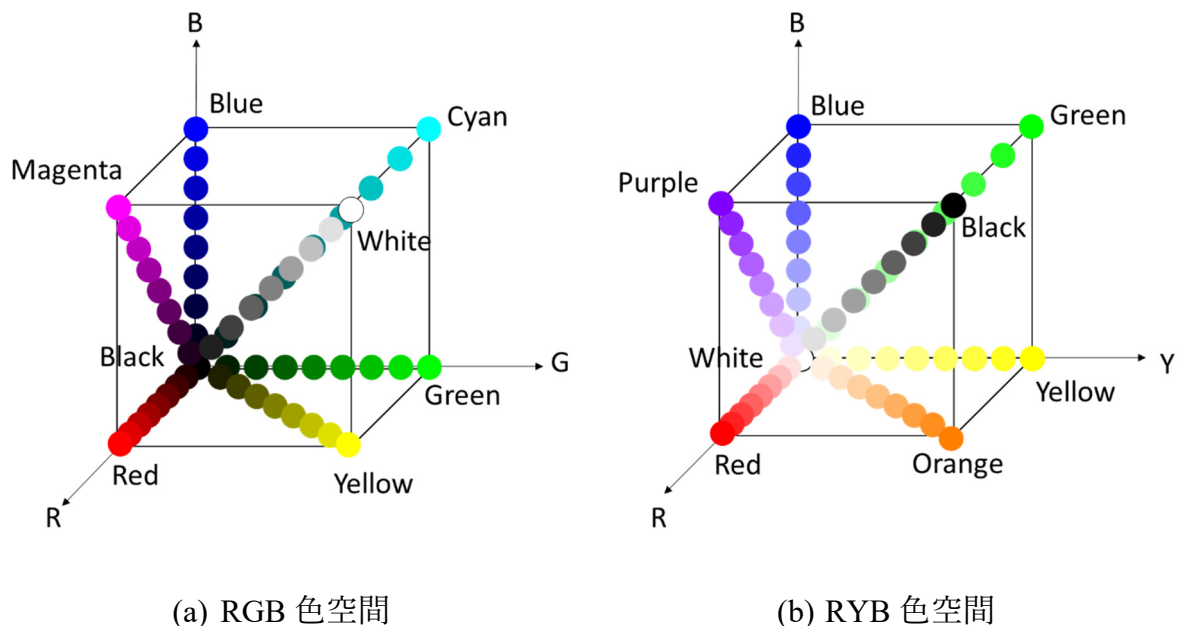


図 4.4 RGB 色空間と RYB 色空間

Fig.4.4 RGB and RYB color spaces

4.2.3 RGB カラーモデルと RYB カラーモデルの関係

RYB カラーモデルは理想的な絵具の混色を経験に基づいてモデル化したものである。本研究では、コンピュータとの親和性を考慮して、RYB カラーモデルを次のように定義する。表 4.1, 4.2 は RGB カラーモデルと RYB カラーモデルの代表的な値の関係を示したものである。表 4.1 は図 4.4 (a) に示す RGB 立方体の 8 つの角の色を、表 4.2 は図 4.4 (b) に示す RYB 立方体の 8 つの角の色を示したものである。RGB, RYB の各チャンネルの値の範囲は $[0, 1]$ である。

表 4.1 RGB 立方体の 8 つの角の RGB 値と RYB 値の関係

Table 4.1 Relationships between the values of each channel in RGB and RYB spaces for the eight colors at the corners of the RGB color cube








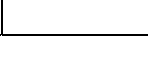




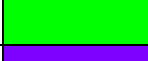



Name	Color	RGB values	RYB values
Red		(1, 0, 0)	(1, 0, 0)
Green		(0, 1, 0)	(0, 1, 1)
Blue		(0, 0, 1)	(0, 0, 1)
Yellow		(1, 1, 0)	(0, 1, 0)
Cyan		(0, 1, 1)	(0, 0.5, 1)
Magenta		(1, 0, 1)	(1, 0, 0.5)
Black		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)
White		(1, 1, 1)	(0, 0, 0)

表 4.2 RYB 立方体の 8 つの角の RYB 値と RGB 値の関係

Table 4.2 Relationships between the values of each channel in RYB and RGB spaces for the eight colors at the corners of the RYB color cube

Name	Color	RYB values	RGB values
Red		(1, 0, 0)	(1, 0, 0)
Yellow		(0, 1, 0)	(1, 1, 0)
Blue		(0, 0, 1)	(0, 0, 1)
Orange		(1, 1, 0)	(1, 0.5, 0)
Green		(0, 1, 1)	(0, 1, 0)
Purple		(1, 0, 1)	(0.5, 0, 1)
White		(0, 0, 0)	(1, 1, 1)
Black		(1, 1, 1)	(0, 0, 0)

4.3 RGB-RYB 変換

本節では、RGB 色空間から RYB 色空間への変換式、および、逆変換式を提案する。ここで扱う RGB, RYB それぞれのチャンネルの値の範囲は $[0, 1]$ とする。4.3.1 項で RGB 色空間から RYB 色空間への変換方法について、4.3.2 項で RYB 色空間から RGB 色空間への変換方法について述べる。

4.3.1 項で述べる RGB 色空間から RYB 色空間への変換の概要を図 4.5 (a) に示す。まず、入力の RGB 値から白色成分を除去する (式 (4.1) ~ (4.3))。次に、RGB 色空間から RYB 色空間へ変換する (式 (4.5) ~ (4.7))。RGB 値から RYB 値を導出する過程の詳細は付録 A に示す。さらに、RYB 値の正規化を行う (式 (4.8) ~ (4.10))。最後に、黒色成分を付加する (式 (4.12) ~ (4.14))。白色成分の除去、および、黒色成分の付加は、加法混色から減法混色へ変更するために必要となる。

4.3.2 項の RYB 色空間から RGB 色空間への変換も同様の考え方で行われる (図 4.5 (b))。

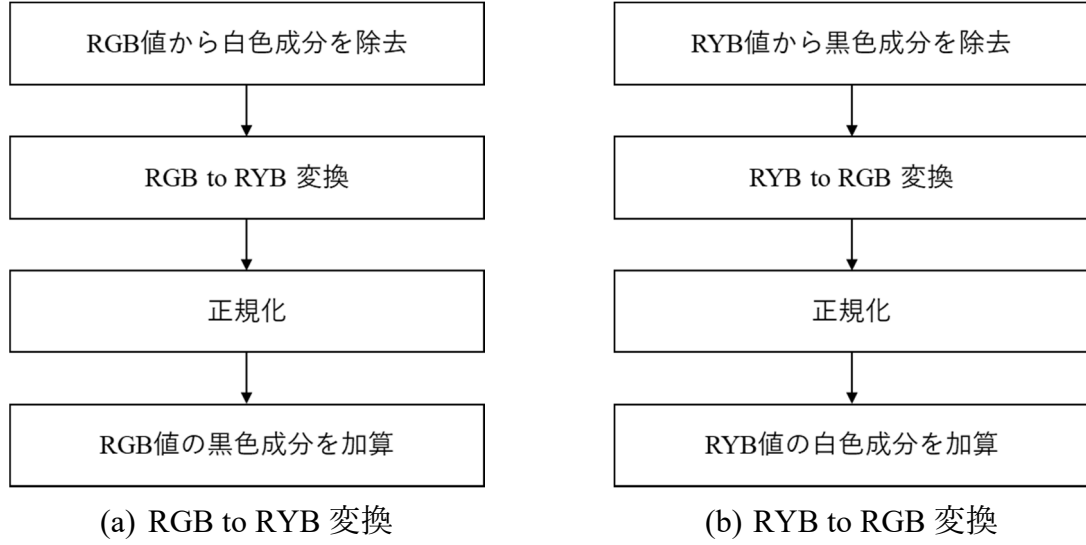


図 4.5 RGB 色空間と RYB 色空間の変換の流れ

Fig. 4.5 Overview of conversion between RGB and RYB color spaces

4.3.1 RGB to RYB 変換

入力となる RGB 値 $(R_{RGB}, G_{RGB}, B_{RGB})$, から RYB 値 $(R_{RYB}, Y_{RYB}, B_{RYB})$ を出力することを考える. ここで, $0 \leq R_{RGB}, G_{RGB}, B_{RGB}, R_{RYB}, Y_{RYB}, B_{RYB} \leq 1$ とする. 入力値から次式により白色成分 I_w を除去する.

$$r_{RGB} = R_{RGB} - I_w \quad (4.1)$$

$$g_{RGB} = G_{RGB} - I_w \quad (4.2)$$

$$b_{RGB} = B_{RGB} - I_w \quad (4.3)$$

白色成分 I_w は次式により求める.

$$I_w = \min\{R_{RGB}, G_{RGB}, B_{RGB}\} \quad (4.4)$$

ここで, $\min\{\}$ は引数の最小値を返す関数である. 次式により RYB 色空間へ変換する.

$$r_{RYB} = r_{RGB} - \min\{r_{RGB}, g_{RGB}\} \quad (4.5)$$

$$y_{RYB} = \frac{\min\{r_{RGB}, g_{RGB}\} + g_{RGB}}{2} \quad (4.6)$$

$$b_{RYB} = \frac{b_{RGB} + g_{RGB} - \min\{r_{RGB}, g_{RGB}\}}{2} \quad (4.7)$$

式 (4.5), (4.6), (4.7) を正規化すると,

$$r'_{RYB} = \begin{cases} \frac{r_{RYB}}{n} & \text{if } n > 0 \\ r_{RYB} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$y'_{RYB} = \begin{cases} \frac{y_{RYB}}{n} & \text{if } n > 0 \\ y_{RYB} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.9)$$

$$b'_{RYB} = \begin{cases} \frac{b_{RYB}}{n} & \text{if } n > 0 \\ b_{RYB} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.10)$$

となる. ここで, n は次式により得られる.

$$n = \frac{\max\{r_{RYB}, y_{RYB}, b_{RYB}\}}{\max\{r_{RGB}, g_{RGB}, b_{RGB}\}} \quad (4.11)$$

ここで, $\max\{\}$ は引数の最大値を返す関数である. 減法混色モデルとするために, 黒色成分 I_b を加算し, 最終的な RYB 値を次式により得る.

$$R_{RYB} = r'_{RYB} + I_b \quad (4.12)$$

$$Y_{RYB} = y'_{RYB} + I_b \quad (4.13)$$

$$B_{RYB} = b'_{RYB} + I_b \quad (4.14)$$

ここで, I_b は次式により得られる.

$$I_b = \min\{1 - R_{RGB}, 1 - G_{RGB}, 1 - B_{RGB}\} \quad (4.15)$$

4.3.2 RYB to RGB 変換

入力となる RYB 値 ($R_{RYB}, Y_{RYB}, B_{RYB}$) から RGB 値 ($R_{RGB}, G_{RGB}, B_{RGB}$) を出力することを考える. 入力値から次式により黒色成分 I_b を除去する.

$$r_{RYB} = R_{RYB} - I_b \quad (4.16)$$

$$y_{RYB} = Y_{RYB} - I_b \quad (4.17)$$

$$b_{RYB} = B_{RYB} - I_b \quad (4.18)$$

黒成分 I_b は次式により求める.

$$I_b = \min\{R_{RYB}, Y_{RYB}, B_{RYB}\} \quad (4.19)$$

次式により RYB 色空間へ変換する.

$$r_{RGB} = r_{RYB} + y_{RYB} - \min\{y_{RYB}, b_{RYB}\} \quad (4.20)$$

$$g_{RGB} = y_{RYB} + \min\{y_{RYB}, b_{RYB}\} \quad (4.21)$$

$$b_{RGB} = 2(b_{RYB} - \min\{y_{RYB}, b_{RYB}\}) \quad (4.22)$$

式 (4.20), (4.21), (4.22) を正規化すると,

$$r'_{RGB} = \begin{cases} \frac{r_{RGB}}{n} & \text{if } n > 0 \\ r_{RGB} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.23)$$

$$g'_{RGB} = \begin{cases} \frac{g_{RGB}}{n} & \text{if } n > 0 \\ g_{RGB} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.24)$$

$$b'_{RGB} = \begin{cases} \frac{b_{RGB}}{n} & \text{if } n > 0 \\ b_{RGB} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.25)$$

となる. ここで, n は次式により得られる.

$$n = \frac{\max\{r_{RGB}, g_{RGB}, b_{RGB}\}}{\max\{r_{RYB}, y_{RYB}, b_{RYB}\}} \quad (4.26)$$

減法混色モデルとするために, 黒色成分 I_b を加算し, 最終的な RYB 値を次式により得る.

$$R_{RGB} = r'_{RGB} + I_w \quad (4.27)$$

$$G_{RGB} = g'_{RGB} + I_w \quad (4.28)$$

$$B_{RGB} = b'_{RGB} + I_w \quad (4.29)$$

ここで, I_b は次式により得られる.

$$I_w = \min\{1 - R_{RYB}, 1 - Y_{RYB}, 1 - B_{RYB}\} \quad (4.30)$$

4.4 混色法

4.3 節で RGB 色空間と RYB 色空間の相互変換式を提案した。これにより，RYB 色空間で，RGB 色空間と同様の混色法を使用できるようになった。本節では，単純加算法，アルファブレンディング，重み付き加算法の 3 つの混色法について述べる。

単純加算法は，2 つの RYB 値を加算する方法である。図 4.1 (a) や図 4.2 (a) に示す Itten のモデルと同様の結果を得ることができる。しかしながら，実際の絵具の混色では，顔料内で光の散乱が起こるため，混色結果は顔料の反射率，および，顔料の透明度に大きく依存する。実際の絵具の混色を模擬するために，アルファブレンディングや重み付き加算法が有効だと思われる。

RYB 色空間上で，前景色 C_{fore} と背景色 C_{back} の 2 色を混色することを考える。前景色 C_{fore} と背景色 C_{back} は，それぞれ赤，黄，青の 3 値からなる。

4.4.1 単純加算法

最も単純な混色方法は，前景色と背景色を加算することである。単純加算法による混色結果 C_{add} は次式により求める。

$$C_{add} = C_{fore} + C_{back} \quad (4.31)$$

単純加算法は，基本的な混色表現である。例えば，RYB 空間上で，青 (0, 0, 1) と黄 (0, 1, 0) を加算すると，緑 (0, 1, 1) となる。

4.4.2 アルファブレンディング

アルファブレンディングは単純かつ効果的なため，コンピュータグラフィックスの分野において，しばしば用いられる手法である [56]。アルファブレンディングは 2 つの色の透過性を考慮した方法である。 α は透過率を表す。 α の取り得る範囲は $[0, 1]$ である。 $\alpha = 0$ で完全に透明となり， $\alpha = 1$ で完全に不透明となる。アルファブレンディングの混色結果 C_{alpha} は次式により求まる。

$$C_{alpha} = \alpha C_{fore} + (1 - \alpha) C_{back} \quad (4.32)$$

4.4.3 重み付き加算法

顔料の種類によっては、混色結果が塗り重ねた顔料の厚みに依存することがある。前景色を薄く塗った場合は背景色が強く表れ、前景色を厚く塗った場合は前景色が強く表れる。また、吸光度が高い顔料を使用すると、混色した色が暗くなる傾向にある。これらの理由から、重み付き加算法を提案する。重み付き加算法は、前景色または背景色のどちらか一方を強調して混色することができる。重み付き加算法の混色結果 C_w は、次式により求める。

$$C_w = C_{fore} + wC_{back} \quad (4.33)$$

ここで、 w は重み係数である。

4.5 実験結果

RYB カラーモデルの有効性を検証するために、実験を行った。

4.5.1 実装された RYB カラーモデルの全体像

RYB カラーモデルは絵具の混色の理想形をモデル化したものである。4.3 節で提案した式による RYB カラーモデルを実装し、Itten の RYB カラーモデルを正しく再現できているか確認する。HSL (Hue-Saturation-Lightness) カラーモデルを利用して、色相 (Hue)、彩度 (Saturation)、明度 (Lightness) を可視化する。比較のため、RGB 色空間についても同様に可視化を行う。HSL 色空間から RYB 色空間への変換には、ColorMine ライブラリ [57] を用いた。ColorMine ライブラリは、オープンソースの色空間の相互変換ライブラリである。HSL 色空間から RYB 色空間へ変換するために、HSLtoRGB 関数を用いる。ここで、最終的に画面に表示するために、RYB 色空間から RGB 色空間へ変換する必要があることに注意が必要である。すなわち、HSL→RYB→RGB と変換する。図 4.6 (a) に詳細を示す。なお、逆変換 (RYB 色空間から HSL 色空間への変換) は図 4.6 (b) の通り実施される。

Procedure 1 HSLtoRYB (c_{hsl})

$c_{ryb} \leftarrow \text{HSLtoRGB}(c_{hsl})$ [HSL to RGB conversion by e.g., ColorMine];
 $c_{rgb} \leftarrow \text{RYBtoRGB}(c_{ryb})$ [RYB to RGB conversion by Eqs. (4.16) – (4.30)];
return c_{rgb} ;

(a) HSL to RYB 変換

Procedure 2 RYBtoHSL (c_{ryb})

$c_{rgb} \leftarrow \text{RYBtoRGB}(c_{ryb})$ [RYB to RGB conversion by Eqs. (4.16) – (4.30)];
 $c_{hsl} \leftarrow \text{RGBtoHSL}(c_{rgb})$ [RGB to HSL conversion by e.g., ColorMine];
return c_{hsl} ;

(b) RYB to HSL 変換

図 4.6 HSL-RYB 色空間の変換法

Fig4.6 Procedure of conversion between HSL to RYB color spaces

図 4.7 に RYB カラーモデルの、図 4.8 に RGB カラーモデルの HSL 表現を示す。図 4.7 と図 4.8 は、HSL 色空間の色相 (H)、彩度 (S)、明度 (L)のうちの 2 軸を 2 次元平面に投影したものである。ここで、色相の範囲は $[0, 360]$ 度、彩度と明度の範囲は $[0, 1]$ である。図 4.7 (a) と図 4.8 (a) は、明度を 0.5 に固定した場合の、色相と彩度からなる空間である。図 4.7 (b) と図 4.8 (b) は、色相を 0° に固定した場合の、彩度と明度の空間である。図 4.7 (c) と図 4.8 (c) は、彩度を 0.5 に固定した場合の、色相と明度の空間である。

図 4.7 (a) と同図 (c) より、色の並びが図 4.2 (a) に示す RYB 色相環と同じであることがわかる。すなわち、赤、オレンジ、黄、緑、青、紫の順である。

図 4.8 (b) と同図 (c) より、明度が 1 に近づくにつれて、明るくなることがわかる。これは、RGB カラーモデルが加法混色モデルだからである。一方、図 4.7 (b) と同図 (c) より、明度が 1 に近づくにつれて、暗くなっていることがわかる。これにより、提案法による RYB カラーモデルが、減法混色を実現できていることがわかる。

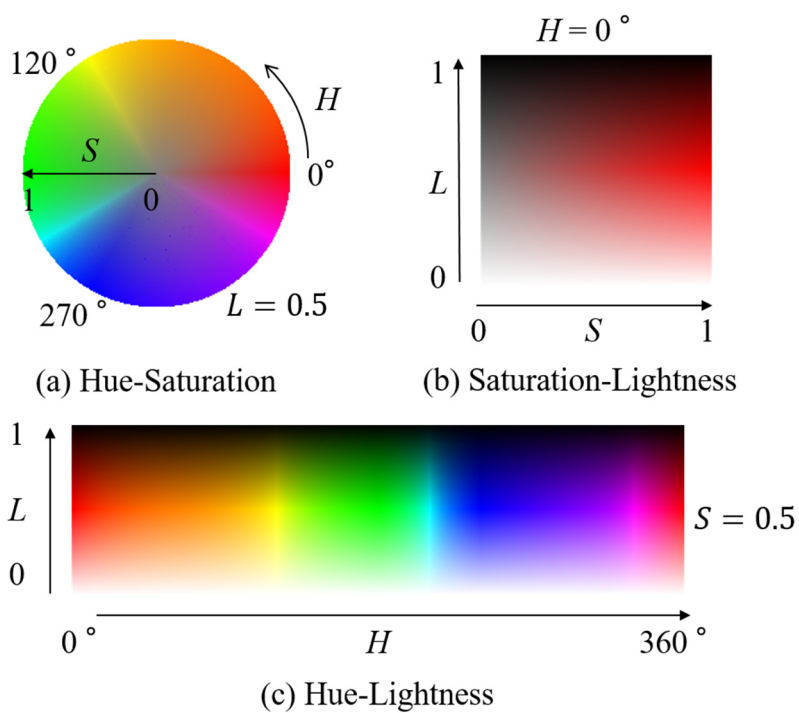


図 4.7 RYB 色空間の HSL 表現

Fig.4.7 The HSL representation of the RYB color space

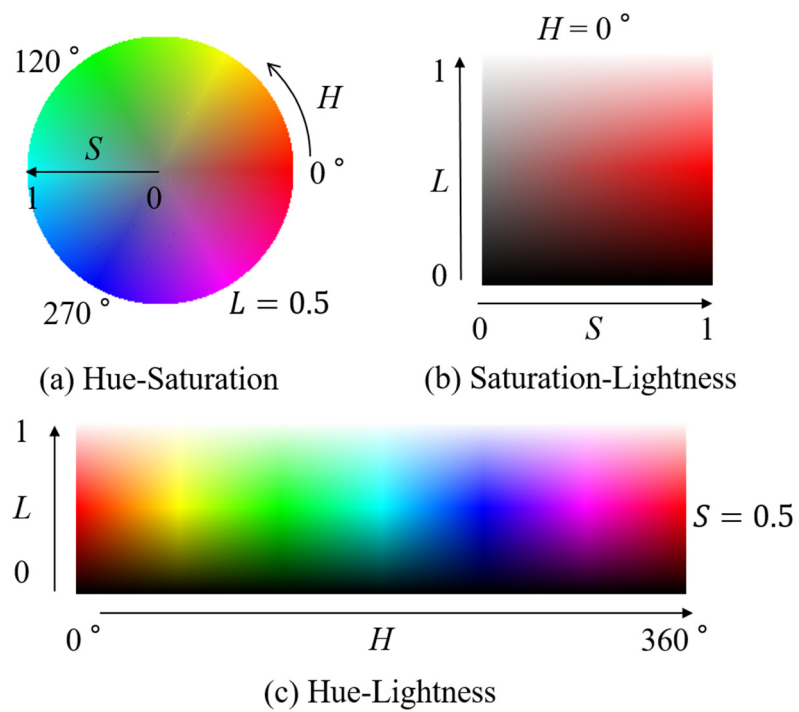


図 4.8 RGB 色空間の HSL 表現

Fig. 4.8 The HSL representation of the RGB color space

4.5.2 混色結果

図 4.1 (a) は、単純加算法により生成したものである。図 4.1 (a) の色が重なった領域の色は、式 (4.31) を用いて求めた。図 4.1 (a) に示すように、赤、黄、青の三原色のうち 2 色の組み合わせにより、オレンジ、緑、紫が生成されていることがわかる。この結果は、Itten の理論と一致するものである。

本項では、アルファブレンディングと重み付き加算法を RYB 色空間で用いた場合の、混色結果について述べる。

4.5.2.1 カラーチャートの比較

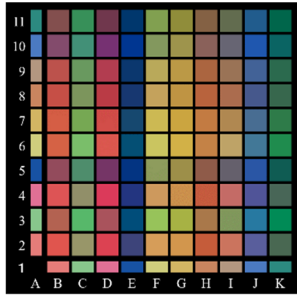
カラーチャートを用いて、RYB 色空間での混色結果と実際の絵具の混色の結果を視覚的に比較する。カラーチャートは、異なる色の絵具を重ねたときの混色結果を確認するために使われる。カラーチャートは混色時のサンプルやグラウンドトゥールースとなる。

カラーチャートでは、 n 色の基本色のうち 2 色を混色することにより n^2 の混色結果を得る。図 4.9 において、1 行目と A 列目が基本色である。それ以外の色は、基本色から 2 色を混色した結果である。例えば、4 行目、B 列 (4B と表現する) の色は、4A と 1B を混色した結果である。

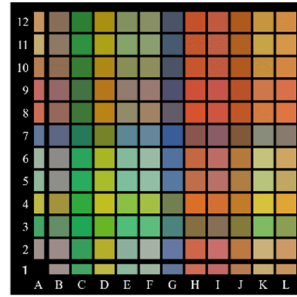
図 4.9 (a) はガッシュ¹、同図 (b) は薄いアクリル、同図 (c) は水彩絵具で描かれた実際のカラーチャートである。図 4.9 (a) ~ (c) は文献 [58] のものを用いた。これらのカラーチャートの画像は、元々はインターネットから取得したものである。Lu ら [58] は、これらのカラーチャート画像に施されたガンマ補正を元に戻し、それぞれのセルの中心付近の色の平均値を求め、一つのセルの色が 1 色になるように加工している。

図 4.9 (d), 同図 (e), 同図 (f) は RYB 色空間での混色法を用いて生成したカラーチャートである。図 4.9 (d), (e) は重み付き加算法を、同図 (f) はアルファブレンディングを用いて生成した結果である。例えば、図 4.9 (d) の 3D の色を 1D と 3A から求めることを考える。まず、1D と 3A の RGB 値を、式 (4.1) ~ (4.15) を用いて RYB 値に変換する。次に、式 (4.33) を用いて 1D と 3D を混色する。このとき、 $C_{fore} = 1D$,

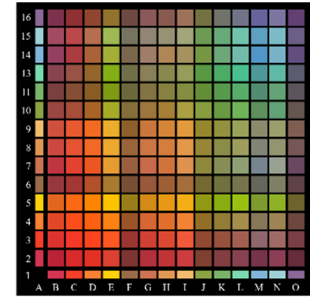
¹ 不透明水彩絵具の 1 種。



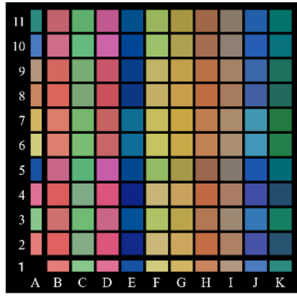
(a) ガッシュ (実物)



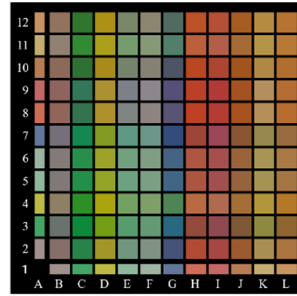
(b) 薄いアクリル (実物)



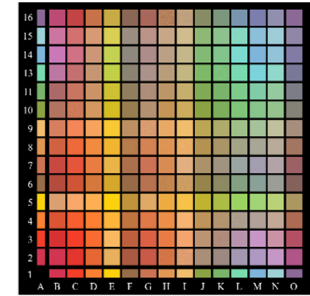
(c) 水彩 (実物)



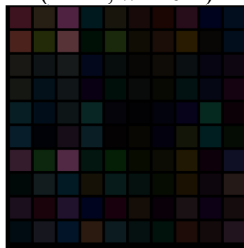
(d) 重み付き加算法
(RYB, $w = 0.2$)



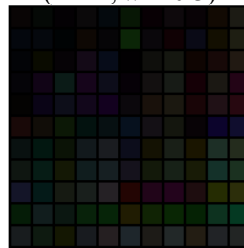
(e) 重み付き加算法
(RYB, $w = 0.3$)



(f) アルファブレンディング
(RYB, $\alpha = 0.6$)



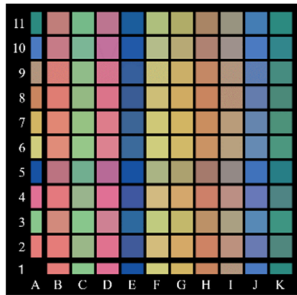
(g) (a)と(d)の差分画像



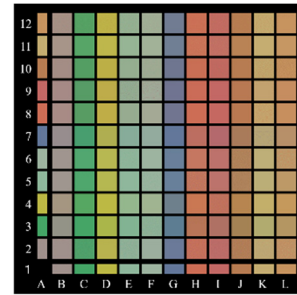
(h) (b)と(e)の差分画像



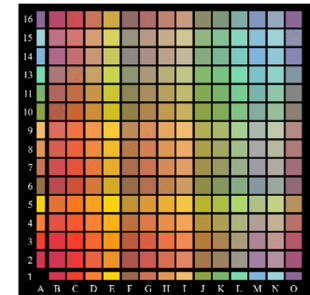
(i) (c)と(f)の差分画像



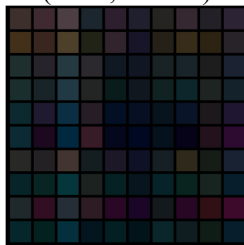
(j) アルファブレンディング
(RGB, $\alpha = 0.8$)



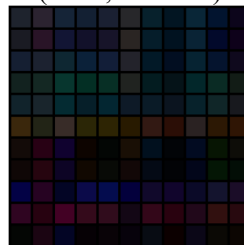
(k) アルファブレンディング
(RGB, $\alpha = 0.85$)



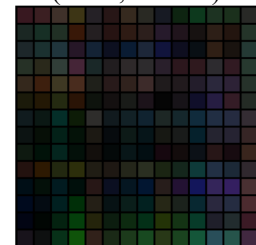
(l) アルファブレンディング
(RGB, $\alpha = 0.6$)



(m) (a)と(j)の差分画像



(n) (b)と(k)の差分画像



(o) (c)と(l)の差分画像

図 4.9 実際のカラーチャートと生成されたカラーチャートの比較

Fig. 4.9 Comparison between actual color charts and our generated results

$C_{back} = 3A$ となり, $w = 0.2$ とした. 最後に, 3D の RYB 値を, 式 (4.16) ~ (4.30) を用いて RGB 値に変換し, 3D に表示する.

アルファブレンディングと重み付き加算法のどちらを使用するのが効果的かは, 4.5.2.2 目で議論する.

図 4.9 (g), 同図 (h), 同図 (i) に実際のカラーチャートと RYB カラーモデルを用いて生成されたカラーチャートとの差分画像を示す. 比較のため, 図 4.9 (j), 同図 (k), 同図 (l) に RGB 色空間上での混色による結果を示す. 図 4.9 (m), 同図 (n), 同図 (o) は実際のカラーチャートと RGB カラーモデルを用いて生成されたカラーチャートとの差分画像である.

RYB カラーモデルを用いた結果は, いくつかの色に関しては, 実際の絵具の混色と異なる部分があるが, RGB カラーモデルと比較して, おおむね絵具の混色結果を近似できていることがわかる. アルファブレンディングや重み付き加算法は, それぞれ 1 つのパラメータ (α と w) しか持たないため, おおまかにしか調整はできないが, 簡単に使用できるという利点がある.

4.5.2.2 絵具の混色の再現性

RYB カラーモデルが, 絵具の混色をどれだけ再現できているかを検証する. 実際の絵具の混色結果と RYB カラーモデルに基づく混色結果の CIELab 色空間 [51] での色差を求めた. 実際の絵具の混色結果として, 図 4.9 (a) のガッシュ, 同図 (b) の薄いアクリル, 同図 (c) の水彩のカラーチャートを使用した. RGB 色空間から CIELab 色空間への変換には, ColorMine ライブラリ [57] を用いた.

カラーチャート n 色の基本色と n^2 色の混色結果からなる. CIELab 色空間において, 実際の混色結果と RYB カラーモデルによる混色結果の色差を求める. i 色目 ($i \in n^2$) の混色結果の色差 ΔE_i は次式で求める.

$$\Delta E_i = \sqrt{(\Delta L_i^*)^2 + (\Delta a_i^*)^2 + (\Delta b_i^*)^2} \quad (4.34)$$

ここで, ΔL_i^* , Δa_i^* , Δb_i^* は L^* , a^* , b^* 値の差分である. ΔE_i の平均値 ΔE_{avg} は次式で求める.

$$\Delta E_{avg} = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^{n^2} \Delta E_i \quad (4.35)$$

表 4.3 に，単純加算法，アルファブレンディング，重み付き加算法の 3 つの混色法それぞれの ΔE_{avg} の値を示す．比較のため，RGB カラーモデルも同様に色差を求めた．パラメータ α と w の値は，もっともよい結果が得られる値を用いた．なお，パラメータの詳細については，4.5.2.3 目で議論する．

表 4.3 に示すように，単純加算法では，RYB カラーモデルがガッシュ，アクリル，水彩の全てにおいて，RGB カラーモデルより良好な結果を得られた．

アルファブレンディングでは，RYB カラーモデルより RGB カラーモデルの方がややよい結果となっている．色差が 1.0 から 2.3 の間は，丁度可知差異 (Just-noticeable difference: JND) とされている [59]．一般的に，JND 以下の色差では，ほぼ違いを知覚できない．すなわち，アルファブレンディングでは，RGB カラーモデルと RYB カラーモデルによる差は，ほとんどないと考えられる．

表 4.3 RYB/RGB カラーモデルに基づく混色の色差の平均値

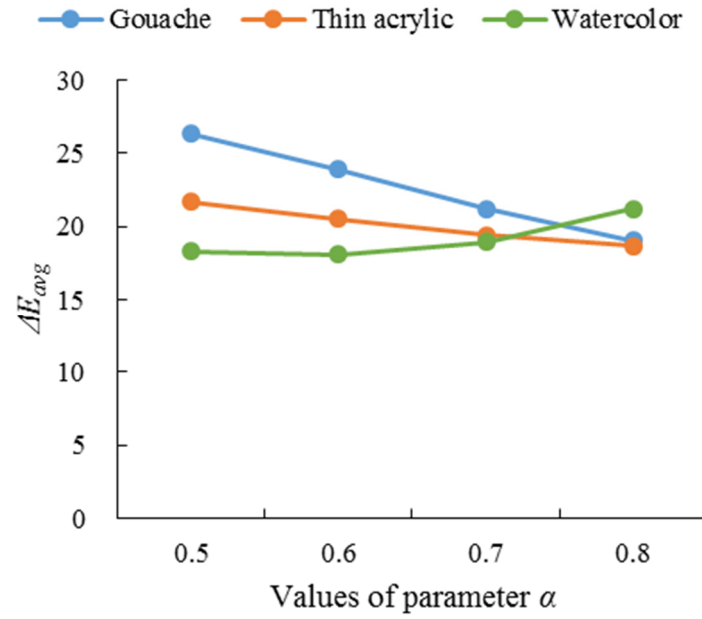
Table 4.3 Results of color differences between the color charts generated by using the RYB/RGB color model and the actual color charts

混色法	カラーモデル	ガッシュ	アクリル	水彩
単純加算法	RGB	59.73	52.69	44.00
	RYB	38.89	35.97	26.29
アルファ ブレンディング	RGB	16.90 ($\alpha = 0.8$)	17.37 ($\alpha = 0.85$)	16.33 ($\alpha = 0.6$)
	RYB	19.01 ($\alpha = 0.8$)	18.52 ($\alpha = 0.85$)	18.08 ($\alpha = .6$)
重み付き加算法	RGB	25.44 ($w = 0.2$)	21.69 ($w = 0.2$)	32.62 ($w = 0.2$)
	RYB	23.38 ($w = 0.2$)	13.88 ($w = 0.3$)	19.81 ($w = 0.4$)

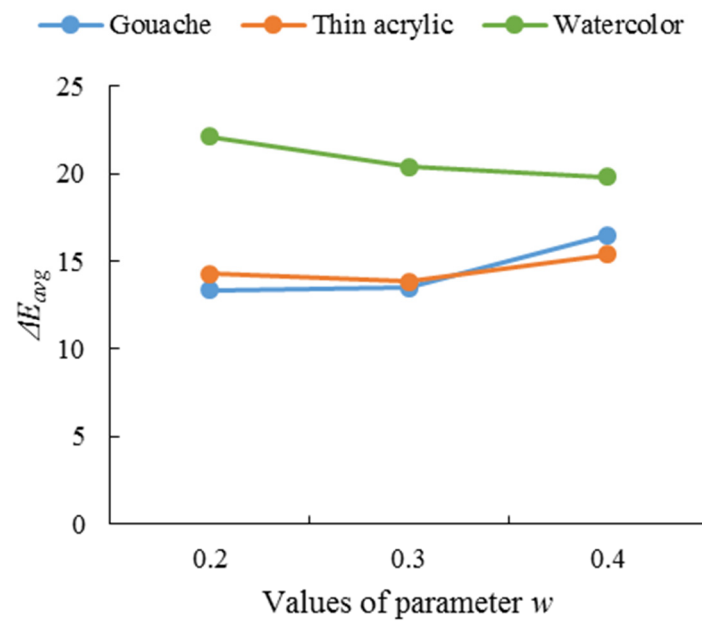
重み付き加算法では、RGB カラーモデルより RYB カラーモデルの方が良好な結果を得られていることがわかる。重み付き加算法による混色は、ガッシュやアクリルのような、前景の色が強く表れるような反射率の高い絵具に適していると考えられる。一方、アルファブレンディングは、水彩絵具のような透過率の高い絵具に適していると考えられる。

4.5.2.3 パラメータの影響

アルファブレンディングと重み付き加算法は、それぞれ α と w のパラメータを用いている。ここでは、これらのパラメータの最適値について検証する。図 4.10 (a) に、アルファブレンディングを用いた場合の、パラメータ α と色差の平均値 ΔE_{avg} との関係を示す。図 4.10 (a) より、水彩絵具のような透過性の高い絵具は、 $\alpha=0.6$ 程度が適しており、ガッシュやアクリルのような透過性の低い絵具は $\alpha=0.8$ 程度が適していることがわかる。図 4.10 (b) に、重み付き加算法を用いた場合の、パラメータ w と色差の平均値 ΔE_{avg} との関係を示す。水彩絵具は $w=0.4$ 程度が、ガッシュやアクリルは $w=0.2, 0.3$ 程度が適切であることがわかる。



(a) アルファブレンディング



(b) 重み付き加算法

図 4.10 パラメータと色差の平均値 ΔE_{avg} の関係

Fig.4.10 Relationship between parameter and average ΔE_{avg}

4.5.3 変換誤差

任意の色空間から別の色空間へ変換し元の色空間に戻した場合、元の値と一致しないことが多い。提案法により RGB 色空間と RYB 色空間を相互変換した場合の変換誤差について検証する。ここでは、RGB、および、RYB 各チャンネルの値の範囲を $[0, 255]$ の 8 ビットとする。RGB 色空間から RYB 色空間へ変換し、再び RYB 色空間から RGB 色空間に戻した際の変換誤差 e_j ($j \in 256^3$) を、次式により求める。

$$e_j = \sqrt{(R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2} \quad (4.36)$$

ここで、 R_1, G_1, B_1 は変換前の RGB 値、 R_2, G_2, B_2 は、RYB 色空間に変換し再び RGB 色空間に戻したときの、RGB 値である。 e_j は RGB の 3 チャンネルすべての組み合わせ (256^3 通り) について計算する。表 4.4 に、変換誤差 e_j の最小値、最大値、平均値、標準偏差を示す。表 4.4 より、提案した変換式は、平均して 1 以内の変換誤差で、RGB - RYB 色空間の相互変換が可能である。

表 4.4 変換誤差

Table 4.4 Results of conversion error

最小値	最大値	平均値	標準偏差
0	4.1231	0.6271	0.7929

4.5.4 RYB カラーモデルの応用

RYB カラーモデルの応用例について議論する。

4.5.4.1 色指定インタフェース

フォトショップ [60] などのフォトタッチソフトウェアやマイクロソフトオフィス [61] のようなオフィススイートでは、ダイアログボックスにより色を指定する場面がしばしばある。このとき、RGB の各チャンネルの値を設定することで色を指定するが、RGB カラーモデルに慣れていない人にとっては、しばしば混乱が生じる。

図 4.11 に RYB カラーモデルによる、色指定のインタフェースの例を示す。

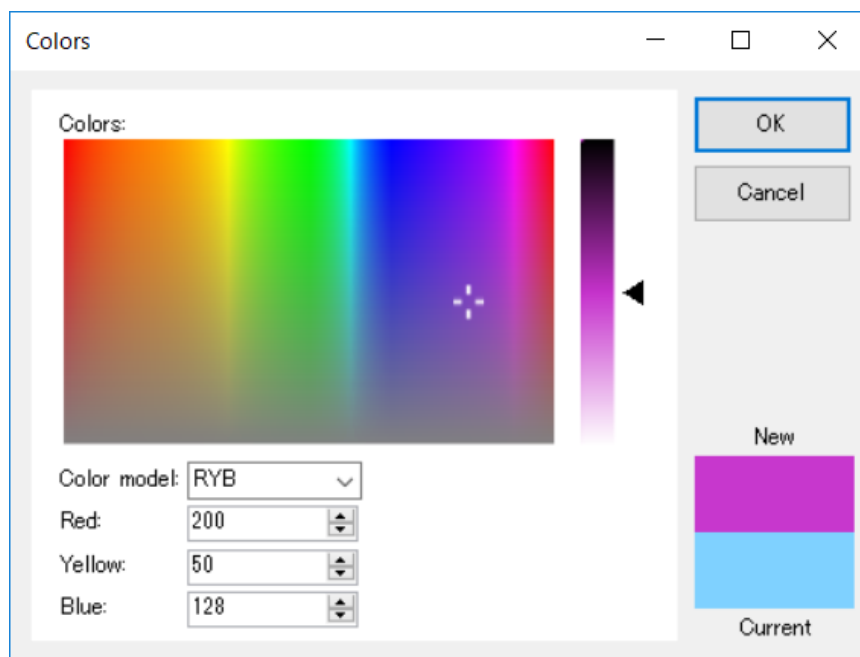


図 4.11 RYB カラーモデルを用いた色指定インターフェースの例

Fig. 4.11 Example of color-setting dialog box by using the RYB color model

RYB カラーモデルを用いることで、絵具を混ぜるような感覚で色の指定を行えるようになると考えられる。

4.5.4.2 ストロークレンダリング

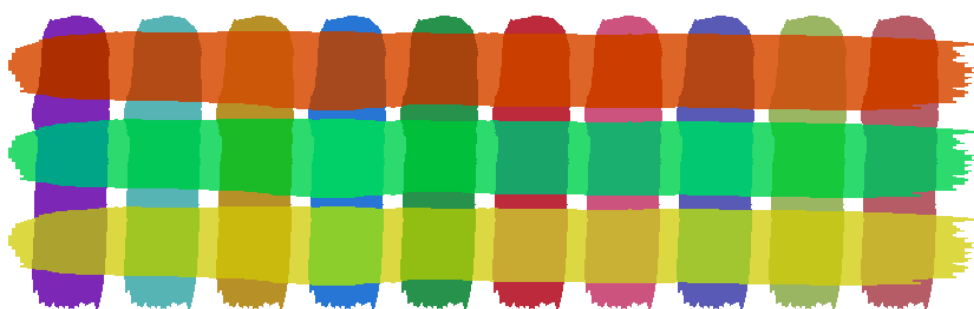
ブラシストロークの描画にも RYB カラーモデルを適用することができる。ストロークが重なった部分の混色を RYB カラーモデルに基づいて行う。

図 4.12 に RYB カラーモデルに基づくブラシストロークの描画結果を示す。図 4.12 (a) は $\alpha = 0.6$ として、アルファブレンディングを用いて混色を行った例である。図 4.12 (b) は $w = 0.25$ として、重み付き加算法により混色を行った例である。縦方向のストロークの上に横方向のストロークを描画した。図 4.12 より、アルファブレンディングの結果の方が、重み付き加算法より前景のストロークの色が強く表れていることがわかる。

RYB 色空間で混色を行うことにより、絵具の混色に近い結果を簡単に得ることができる。それゆえに、RYB カラーモデルは、デジタルペインティングシステム [62] や NPR などのアプリケーションへの利用が期待できる。



(a) アルファブレンディング ($\alpha = 0.6$)



(b) 重み付き加算法 ($w = 0.25$)

図 4.12 RYB カラーモデルに基づくブラシストロークの描画例

Fig.4.12 Example of the brush stroke rendering with different compositing methods

4.5.4.3 水彩画風画像生成への応用

図 4.13 は、RYB カラーモデルによる混色を水彩画風画像生成法に適用した例である。ストロークが重なった領域を重み付き加算法により、RYB 色空間で混色している。生成方法の詳細は、付録 B に示す。ストロークの混色を行っていない第 3 章で示した水彩画風画像の生成例とは異なり、ストロークの重なった部分の混色が表現できていることがわかる。



(a) 原画像



(b) RYB カラーモデルにより混色した水彩画風画像の生成例

図 4.13 RYB カラーモデルにより混色した水彩画風画像の生成例

Fig. 4.13 An example of the watercolor like image by using RYB color compositing

4.5.4.4 可視化

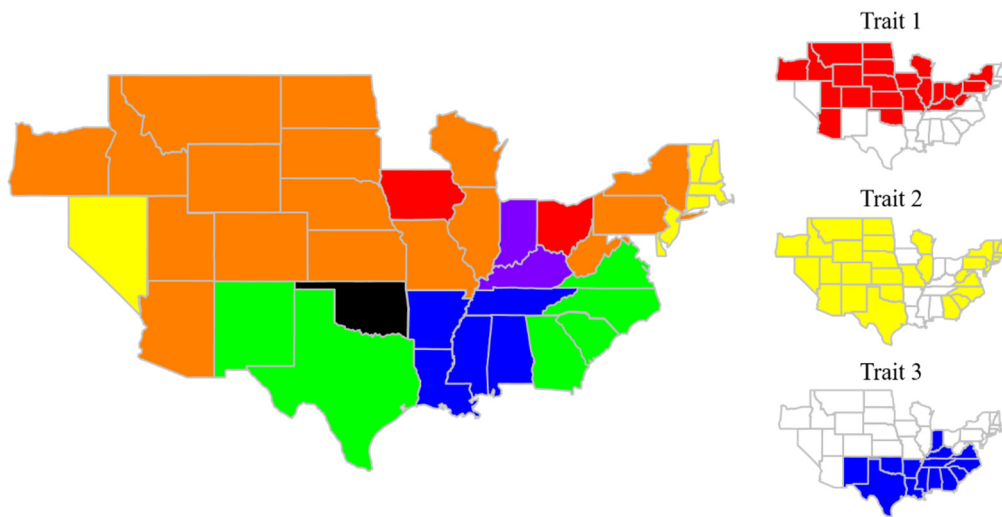
可視化の分野においても，RYB カラーモデルを用いた混色は RGB カラーモデルと比較してより直感的な効果が期待できる [38, 39].

図 4.14 に RYB カラーモデルを用いた多属性データの可視化例を示す. 図 4.14 はアメリカ合衆国の地図である. 三つの特徴を赤, 黄または緑, 青の 3 色を用いて可視化している. 複数の特徴に属する州は, 混色により表現される.

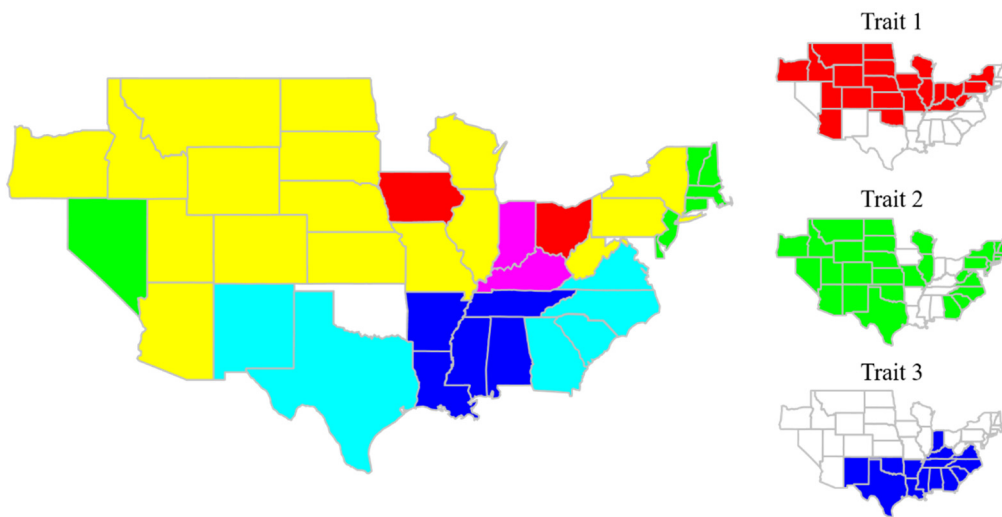
図 4.14 (a) は RYB カラーモデルにより混色した結果, 同図 (b) は RGB カラーモデルにより混色した結果である. ここでは, 単純加算法を用いて混色を行った.

図 4.14 (b) に示す RGB の結果を見ると, オクラホマ州が白で表現されている. オクラホマ州は三つの特徴すべてに属しているが, RGB の混色結果では白で表現されているため, これを見たユーザは, オクラホマ州はどの特徴にも属していないと錯覚する恐れがある. 一方, 図 4.14 (a) の RYB カラーモデルにより混色した結果は, オクラホマ州は黒で表現されている. RGB カラーモデルに比べて, RYB カラーモデルの結果の方が, オクラホマ州が三つすべての特徴に属していることがわかりやすいと考えられる.

図 4.15 は RYB 色空間でアルファブレンディングを用いて混色した例である. この例では, Perlin Noise [30] を用いて生成したテクスチャをオーバーレイ合成することで, 絵具のような質感を表現した.



(a) RYB カラーモデル



(b) RGB カラーモデル

図 4.14 混色に基づく多属性データの可視化例

Fig.4.14 Example of visualization of multi-variate data with color compositing strategy

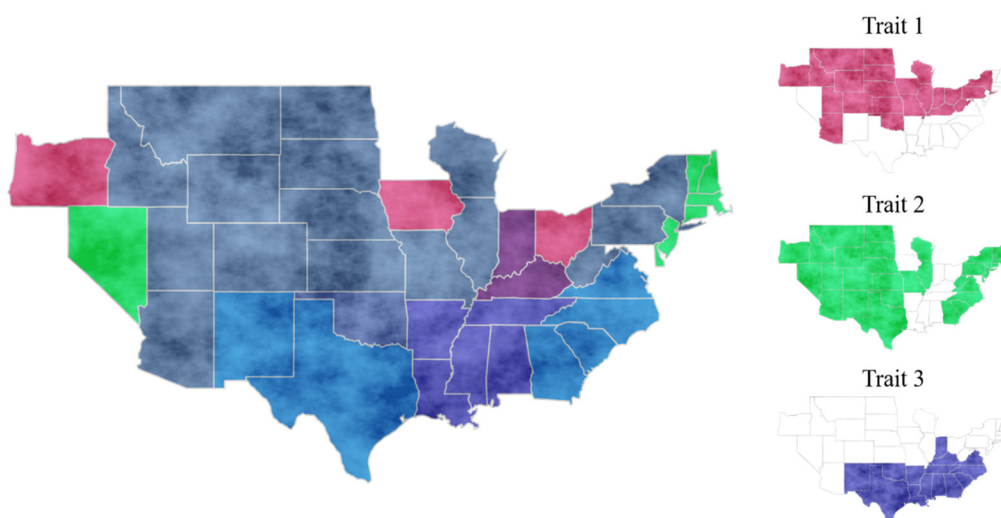


図 4.15 RYB 空間でのアルファブレンディングによる可視化例

Fig.4.15 Use of alpha compositing in the RYB color space on the map

4.6 まとめ

本章では，コンピュータで利用可能な RYB カラーモデルと RYB カラーモデルに基づく混色法について提案した．RGB 色空間から RYB 色空間への変換，および，逆変換を定式化した．また，RYB 色空間での混色の有効性についても検証した．RYB カラーモデルをいくつかのアプリケーションに応用し，コンピュータでの RYB カラーモデルの有効性を示した．

RYB カラーモデルにより，簡単に絵具の混色を再現できることを示した．RYB カラーモデルを用いることで，RGB カラーモデルに慣れていないユーザにとって，絵具の混色に近い直感的な混色が可能となった．

第 5 章

スーラの色彩理論に基づく点描画風画像生成法

5.1 はじめに

点描は、線ではなく点や非常に短いタッチのストロークで表現する技法である。新印象派¹の代表的な画家であるジョルジュ・スーラ (Georges-Pierre Seurat; 1859-1891) は科学的な色彩理論を取り入れ、点描主義を確立した。新印象派の点描画の主な特徴は、色彩理論を取り入れ、理論的に作品を描いている点である。新印象派の画家のなかでも、特に、スーラは作品に色彩理論を厳密に適用している。

図 5.1 は、スーラの作品の一つである、“グランド・ジャット島の日曜日の午後”である。スーラの点描画の特徴を以下に示す [23, 24].

- (1) **点描**：長いストロークではなく、点や短いタッチのストロークを並置することによって描かれる (図 5.1 (a)).
- (2) **原色の使用**：パレット上で絵具を混色せずに、基本的にチューブから取り出した原色をそのまま使用する。スーラのパレット (図 5.2) に並んでいる絵具を見ると、チューブから出した 11 色の原色が確認できる。絵具の混色は減法混色であるため、混ぜるほど黒く濁る。鮮やかな色彩を表現するために、なるべくパレット上で混色を行わずに描かれる。
- (3) **白色絵具による明度調整**：チューブから取り出した原色に、白色絵具を混ぜて、明度の調整を行う (図 5.2).
- (4) **視覚混合²**：視覚混合とは、隣合わせに置かれた色同士が、網膜上で加法混色を起

¹後期印象派とも呼ばれる。

²並置加法混色とも呼ばれる。

こす効果を言う (図 5.1 (b)). パレット上で色を混ぜるのではなく, 異なる原色をそのままキャンバスに並置させて描くことによって, 視覚混合により混色する.

- (5) **補色対比**: 補色関係にある色を並置することにより, お互いに引き立てあり, より鮮やかに感じる. この効果を補色対比と呼ぶ. 補色は陰影の表現にも使用され, 暗い部分に多く配置される. スーラはシュブルールの色相環 (図 5.3 (a))に基づいて補色を選択している. なお, シュブルールの色相環の色の並びは RYB 色相環 (図 5.3 (b))と同じである. 図 5.1 (c) に補色対比の例を示す. 男性のオレンジのシャツに, オレンジの補色である青い点が描かれている.
- (6) **Halo 効果**: モチーフの輪郭の明度の対比を強調することで, モチーフの形態を浮かび上がらせる効果がある. 図 5.1 (d) に Halo 効果の例を示す. 女性のスカートの背景が明るく描かれていることがわかる.
- (7) **エボシュ**: 点描を行う前に, 白色絵具で地塗りされた画布に, エボシュと呼ばれる下描きが施される. 対象をその固有色で大まかに粗描するものである. エボシュの上から点描が施される. 点描は, 点同士が重ならないように描かれ, 下層のエボシュが覗き見えるような密度で描かれる.

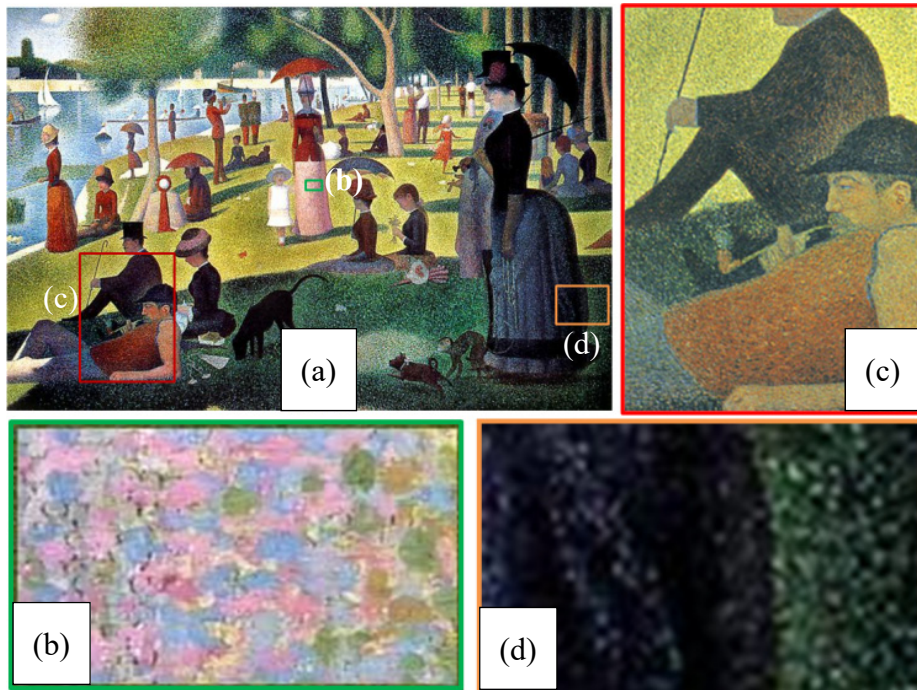


図 5.1 スーラの作品: “グランド・ジャット島の日曜日の午後”

Fig.5.1 Seurat's work: “Sunday afternoon on the island of La Grande Jatte”

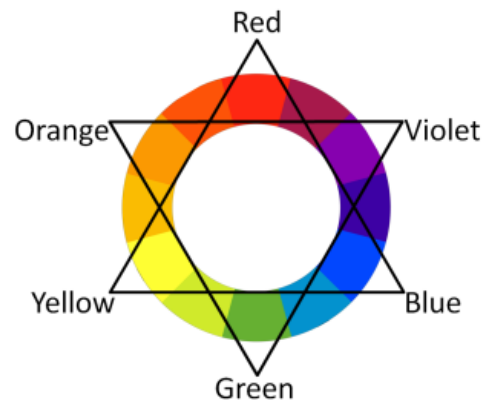


図 5.2 スーラのパレット

Fig.5.2 Seurat's pallet



(a) シュブルールの色相環



(b) RYB 色相環

図 5.3 色相環

Fig.5.3 Color wheels

本研究では、ノンフォトリアリスティックレンダリング (NPR) の一手法として、2次元の入力画像から、前述した七つの特徴を考慮した点描画風画像を生成することを目的とする。スーラの点描画の基礎となる、最も重要な技法である視覚混合を実現するために、点描ハーフトーニング法を提案する。点描ハーフトーニング法は、ランダムに配置した点に対して誤差拡散法 [63] を適用する手法である。提案法により、少ない色数で入力画像の色調を再現することが可能となる。実験により、提案手法がス

ーラの点描画を再現できることを示す.

5.2 点描画風画像生成法

本節では, 2次元画像を入力とし, スーラの技法・色彩理論を考慮した点描画風画像を出力する手法について説明する. 提案手法の概要を図 5.4 に示す.

まず, 入力画像 (図 5.4 (a)) から Halo 画像を生成する (図 5.4 (b)). 純色の点描と補色の描画は, Halo 画像に基づいて行う.

次に, Halo 画像から点描画を生成する (5.4 (c)). 任意の数の純色を用いて点の描画を行う. 点描ハーフトーニング法を用いて, 点をランダムかつ均一に描画する.

さらに, 補色対比の効果を実現するために, 補色で点の描画を行う (図 5.4 (d)). 補色は陰影の表現も兼ねているため, 明度の低い領域に多く配置する.

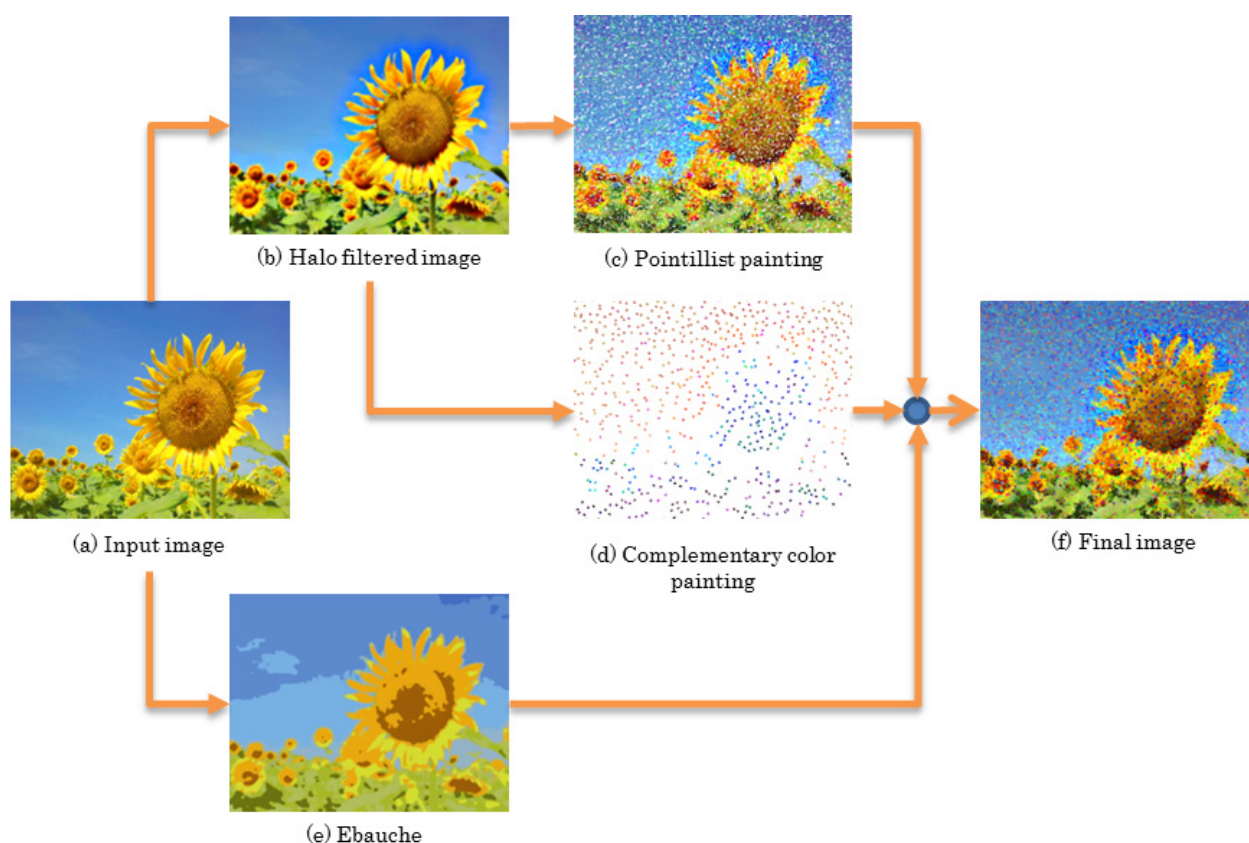


図 5.4 提案手法の概要

Fig.5.4 Overview of the proposal method

そして、入力画像にいくつかの画像処理を施して、エボシュを生成する (図 5.4 (e)).

最後に、エボシュ (図 5.4 (e)), 純色の点描 (図 5.4 (c)), 補色の点描 (図 5.4 (d)) の順に合成することで、点描画風画像を得る (図 5.4 (f)).

5.2.1 Halo 効果

ここでは、画像内の物体のエッジ付近の明暗を強調した画像を Halo 画像と呼ぶ。Halo 画像を生成するために、アンシャープマスクを用いる。アンシャープマスクは、画像の高周波数成分を強調する処理である。アンシャープマスクに 2 種類の重み関数を導入することで、Halo 画像を生成する (以降、拡張アンシャープマスクと呼ぶ)。画素 i における拡張アンシャープマスク U_i は次式で表す。

$$U_i = I_i + w_{dist}w_{lum}(I_i - G_i) \quad (5.1)$$

ここで、 I_i は入力画像の画素 i における輝度値、 G_i は画素 i における低周波数成分であり、カーネルサイズ s のガウシアンフィルタの適用結果である。 $I_i - G_i$ は高周波数成分を表す。本来、Halo は物体の背景の明暗を強調のことを言うが、奥行情報を持たない 2 次元画像では、物体と背景を区別することが難しいため、エッジ付近にのみアンシャープマスクを適用することで Halo 画像を生成する。 w_{dist} は入力画像のエッジ付近にのみアンシャープマスクを適用するための重みであり、次式で定義される。

$$w_{dist} = A \left(1 - \frac{D_i}{s} \right) \quad (5.2)$$

ここで、 A は拡張アンシャープマスクの効き目をコントロールするための定数、 $D_i (0 \leq D_i \leq s)$ は Canny 法 [64] により抽出したエッジを距離変換して得られた距離画像、 s は式 (5.1) で用いたガウシアンフィルタのカーネルサイズである。

アンシャープマスクは暗い部分をより暗く、明るい部分をより明るくするため、入力画像の輝度値の極端に低い部分、または、高い部分に適用すると黒もしくは白になってしまい、入力画像の詳細情報が失われてしまう。そこで、重み w_{lum} を導入する。 w_{lum} は次式で定義される。

$$w_{lum} = B \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{(I_i - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5.3)$$

ここで、 B は定数、 μ は期待値、 σ は分散である．それぞれ、 $B = 100$ 、 $\mu = 127$ 、 $\sigma = 40$ とした． w_{lum} は輝度値の中間値をピークとするガウス分布である．これにより、極端に明るい、または、暗い部分にはアンシャープマスクが適用されないようになる．

図 5.5 に提案手法による Halo 画像の生成結果を示す．図 5.5 (a) は原画像、同図 (b) は原画像からエッジを抽出した結果、同図 (c) は (b) から生成した距離画像、同図 (d) は、 w_{lum} の項無しで生成した Halo 画像であり Seo と Yoon [49] の手法と同じ結果である．図 5.5 (e) は w_{lum} 有りの提案手法による Halo 画像の生成結果である．図 5.5 (d) の茶釜は詳細情報が欠落しており、手や着物の帯は不自然に黒くなってしまっているが、同図 (e) の提案手法による Halo の生成結果では、それらが改善されていることが分かる．

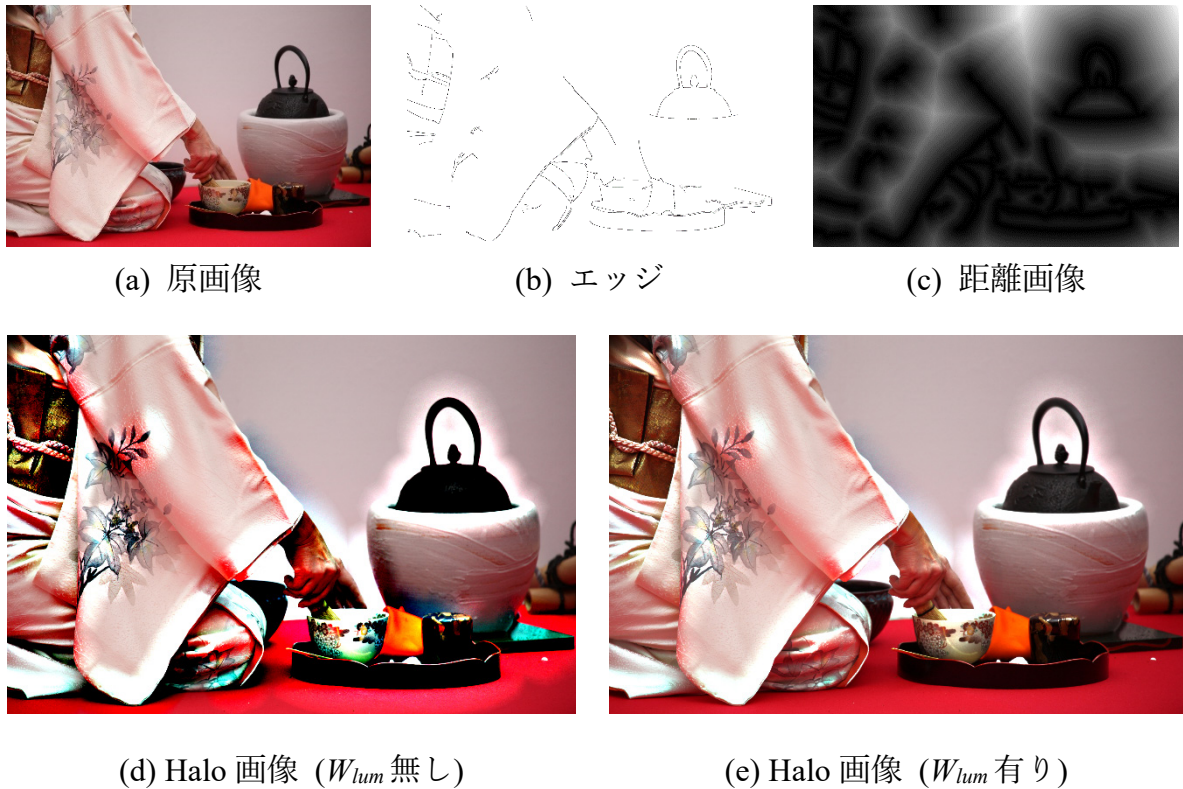


図 5.5 Halo 画像の生成

Fig.5.5 Generation of Halo image

5.2.2 点描ハーフトーニング法

少ない色数で良好な視覚混合を実現するために、ハーフトーニングのアプローチを採用する。ハーフトーニングの代表的な手法に誤差拡散法 [63] があるが、通常、格子状に並んだ画素に対して適用される。しかしながら、点描画では点はランダム、かつ、画面全体に均等に配置される。そこで、Poisson Disk Sampling [65] の高速化手法である、Boundary Sampling [66] の空間的データ構造を利用し、ランダムに配置された点の近傍の点へ誤差を拡散させる点描ハーフトーニング法を提案する。

5.2.2.1 Boundary Sampling

以下の Step1 ～ 6 に示す Boundary Sampling アルゴリズムにより、空間に点をランダムかつ偏りなく配置する。

Step1: 半径 r の円をランダムに配置する。

Step2: Step1 で配置した円の中心の座標値を候補点リスト $\{S_k\}$ に格納する。

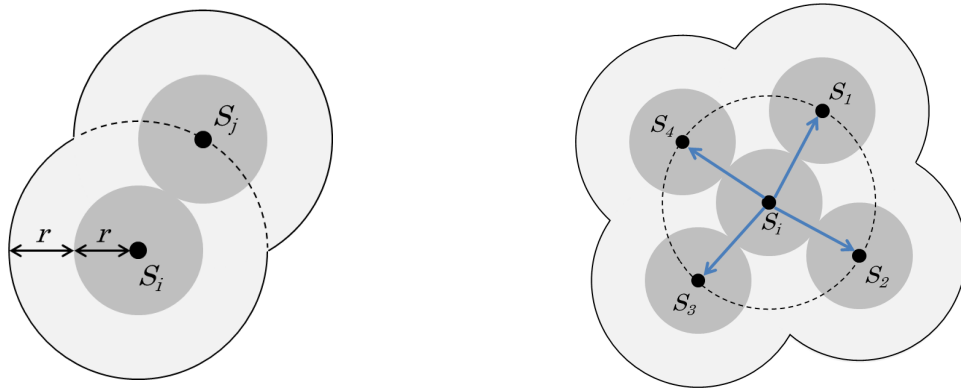
Step3: 候補点リスト $\{S_k\}$ から点 $S_i \in \{S_k\}$ をランダムに取り出す。

Step4: Step3 で取り出した点 S_i の中心から半径 $2r$ の円の円周上に、点 S_j を配置する。

この時、点 S_j を配置可能な点 S_i の中心から半径 $2r$ の円弧の集合を available boundary と呼ぶ。図 5.6 (a) に available boundary の例を示す。点 S_i を中心とする半径 $2r$ の円のうち、実線部の円弧が available boundary である。

Step5: 点 S_i の available boundary 上に点を配置することができなくなるまで、Step4 を繰り返す。配置した点は候補点リスト $\{S_k\}$ に格納する。

Step6: 候補点リスト $\{S_k\}$ が空になるまで、Step3 ～ Step5 を繰り返す。



(a) available boundary への点の配置

(b) 近傍の点への誤差拡散 ($m = 4$)

図 5.6 Boundary Sampling の空間的データ構造

Fig.5.6 A spatial data structure of boundary sampling

5.2.2.2 誤差拡散法

Boundary Sampling でランダム、かつ、均等に配置された点の位置に、短いストロークを模したテクスチャを描画することで、点描画を生成する。スーラは 11 色の原色を使って作品を描いている。したがって、入力画像の色でテクスチャを描画するのではなく、ある程度の色数 (例えば、11 色) に減色する必要がある。少ない色数で入力画像の濃淡を表現するために、Boundary Sampling で配置した点に誤差拡散法を適用する。HSL 色空間において、色相 (H)、彩度 (S_a)、明度 (L) の各チャンネルで量子化を行い、Halo 画像との差分を誤差とする。

Boundary Sampling で配置された、任意の点 S_i の中心から半径 $2r$ の円周上の点の集合 $\{S_m\}$ に誤差を拡散させる。 m は S_i の円周上に配置された点の数である。

まず、点 S_i の中心の座標の色を量子化する。ここでは、HSL 色空間の H , S_a , L の各チャンネルを量子化することを考える。量子化した色相の集合を $\{H_n\}$ 、彩度の集合を $\{S_{an}\}$ 、明度の集合を $\{L_n\}$ とし、円 S_i の中心の座標の入力画像の色相を H_{input} 、彩度を S_{input} 、明度を L_{input} とする。 H , S_a , L の値をそれぞれ均等に n_H , n_{Sa} , n_L 等分した値で量子化する。彩度 n_{Sa} と明度 n_L は 24 とし、色相の数 n_H はパラメータとして扱う。量子化する色相の集合 $\{H_n\}$ 、彩度の集合 $\{S_{an}\}$ 、明度の集合 $\{L_n\}$ と入力画像とのユークリッド距離が最小の値で点 S_i の色相、彩度、明度を更新する。このとき、置き換えた後の誤差を次式で求める。

$$\begin{aligned}
e_H &= H_{input} - H_n \\
e_S &= S_{input} - S_{an} \\
e_L &= L_{input} - L_n
\end{aligned} \tag{5.4}$$

次に，誤差を available boundary 上の点 $\{S_m\}$ に拡散する (図 5.6 (b)).

$$\begin{aligned}
H'_n &= H_n + D_L \frac{e_H}{m} \\
S'_{an} &= S_{an} + \frac{e_S}{m} \\
L'_n &= L_n + \frac{e_L}{m}
\end{aligned} \tag{5.5}$$

ここで， D_L はラプラス分布の確率密度関数の逆関数であり次式で求める．

$$D_L = \begin{cases} \phi \ln 2U + \mu & \text{if } U < 0.5 \\ -(\phi \ln 2(1 - U) + \mu) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{5.6}$$

ここで， μ は期待値， ϕ は分散， U は範囲 $[0, 1]$ の一様乱数を表す．ここでは， $\mu = 0$ ， $\phi = 6$ とする．文献 [49] よりスーラの点描画の色使いがラプラス分布に近いという調査結果が報告されている．これを反映させるために，色相のみラプラス分布に基づき誤差 e_H を $-2/\pi \leq e_H \leq 2/\pi$ の範囲で増幅して拡散させる．

5.2.2.3 点描ハーフトーニング法の効果

点描ハーフトーニング法が視覚混合を実現できていることを検証するために，予備実験を行った．図 5.7 に，色相環 (図 5.7 (a)) を入力として点描ハーフトーニング法を適用した結果を示す．ここでは，色相の数 n_H を 11 (図 5.7 (b)) から 72 (同図 (e)) まで段階的に変更した．図 5.7 より，視覚混合により少ない色数でも，色相環のグラデーションが再現できていることがわかる．

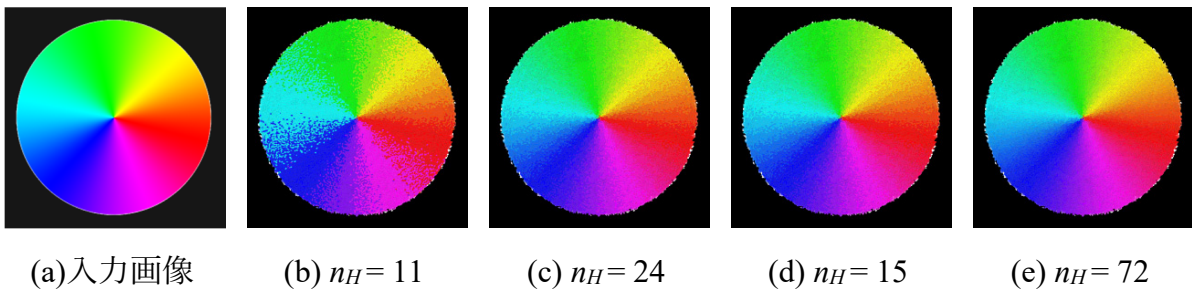


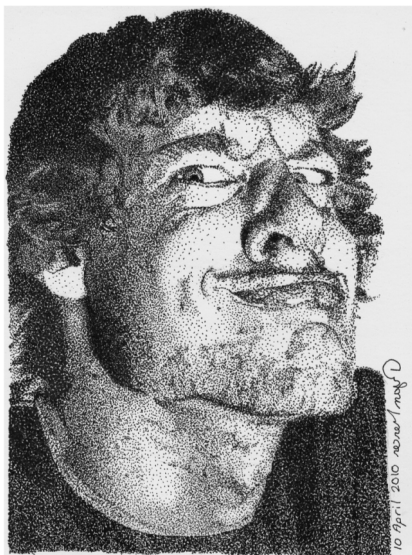
図 5.7 異なる色相数による点描ハーフトニング法の結果

Fig.5.7 Results of the pointillistic halftoning method by using different number of hues

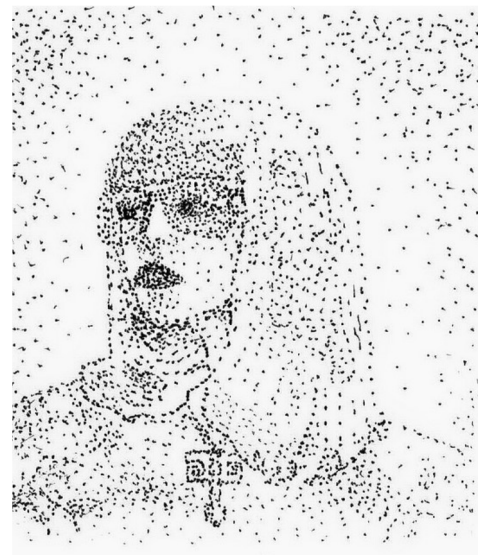
5.2.3 補色対比

補色関係にある色を並置させることで、鮮やかさを増すことができる。さらに、スーラは陰影を表現するためにも、補色を利用している。補色による陰影表現を実現するために、Stippling [67] を生成できるように点描ハーフトニング法を拡張する。

Stippling と点描画 (Pointillism) の区別について説明する。Stippling は点の粗密により描かれる絵画技法である。図 5.8 に実際の Stippling の作品例を示す。一方、図 5.1 に示すように、点描画では点は一様に描かれる。



(a) cdslug



(b) makedonche19

図 5.8 Stippling の作品例 (Flickr より)

Fig.5.8 Examples of artist's stippled work from the Flickr

5.2.3.1 Stippling の生成

点描ハーフトーニング法を拡張して、Stippling を生成する方法を説明する．前処理として，入力画像をグレースケールに変換しておく．Boundary Sampling で配置された点に対して，差拡散法を用いて白黒2値に量子化することを考える．白い点 (輝度値 = 255) は描画されないので，黒で描画される点 (輝度値 = 0) が補色で描画される点となる．

任意の点 S_i から半径 $2r$ にある円周上の点の集合 $\{S_m\}$ に誤差を拡散させる． m は S_i の円周上に配置された点の数である．点 S_i の中心の座標の輝度値を $f_i \in \{0, 255\}$ とする． f_i を次式により2値化し， g_i を得る．

$$g_i = \begin{cases} 255 & \text{if } f_i > 127 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.7)$$

ここで，置き換えた後の誤差を $e = f_i - g_i$ とする．次式により誤差 e を半径 $2r$ の演習上の点 $\{S_m\}$ へ拡散する．

$$I'_n = I_n + w_s \frac{e}{m} \quad (5.8)$$

ここで， I'_n は $\{S_m\}$ の更新後の輝度値， I_n は $\{S_m\}$ における入力画像の輝度値， w_s はガンマ補正項であり，点の密度をコントロールするために用いる． w_s は次式で定義される．

$$w_s = \begin{cases} \left(\frac{1}{r_s}\right)^{G_-} & \text{if } e < 0 \\ r_s^{G_+} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5.9)$$

ここで， r_s は点 S_i の半径であり，後述する式 (5.10) で求める． G_- と G_+ の2つのパラメータを用いて正の誤差と負の誤差を独立して調整する．

5.2.3.2 補色の求め方

5.3.3.1 目で決定した位置 $\{S_{stip}\}$ に，入力画像の補色で点を描画する．スーラは，補色をシュブルールの色相環 (図 5.3 (a)) を用いて描いていた．本研究では，シュブルー

ルの色相環と色の並びが類似している，RYB 色相環 (図 5.3 (b)) を用いる．4 章で提案した RYB カラーモデルを用いて，RYB 色空間から HSL 色空間へ変換を行い，HSL 色空間上で補色を求める．

図 5.9 に任意の色の補色の求め方を示す．まず，点 $\{S_{stip}\}$ の位置の入力画像の色相に，ラプラス分布 (式 (5.6)) を用いて揺らぎを与える．図 5.9 の青い候補点の内 1 つの点を選ぶ．次に，HSL 色空間上で色相を 180° 変更することにより補色を求める．最後に，色相，彩度，明度の各チャンネルを 5.2.2.2 目と同様に量子化する．

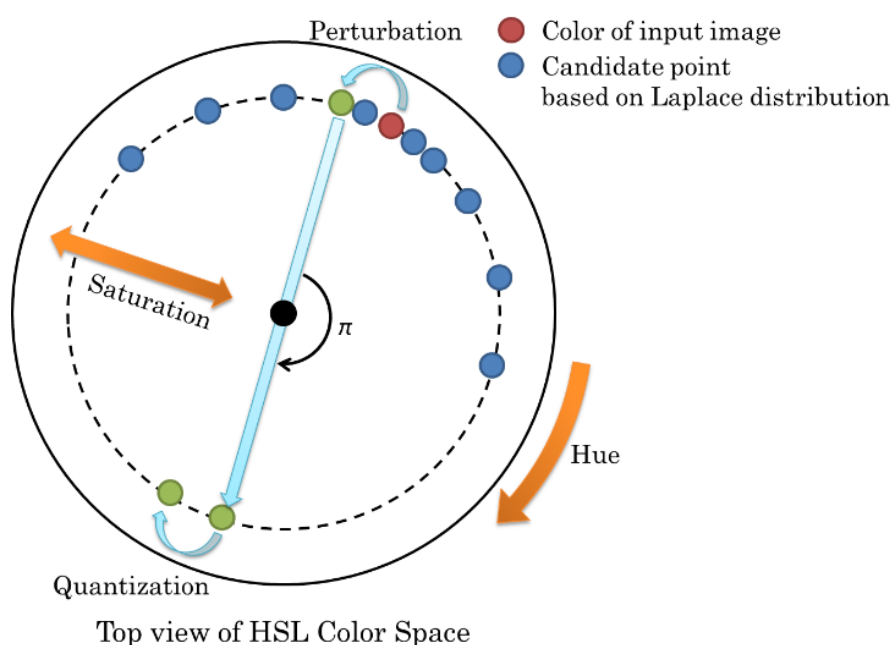


図 5.9 補色の求め方

Fig.5.9 Calculation method of a complementary color

5.2.3.3 補色の描画結果

図 5.10 (a) に補色無しで描画した点描画を，同図 (b) に補色を加えて描画した点描画の例を示す．図 5.10 (b) を見ると，明度の低い領域に補色が多く配置されていることがわかる．



(a) 補色無し

(b) 補色有り

図 5.10 補色の効果

Fig.5.10 Effectiveness of complementary colors

5.2.4 エボシュ

点を描く前に、エボシュと呼ばれる下描きが施される。これは、対象をその固有色で大まかに粗描するものである。エボシュを再現するために、入力画像を薄い色の平坦な画像に変換する。まず、入力画像に対し頻度法 (popularity algorithm)[68] を用いて減色処理を施す。次に、メディアンフィルタで平滑化を行う。

5.2.5 ストロークレンダリング

図 5.11 に示すブラシストロークテクスチャを多数描画することで、点描画を生成する。以下にブラシストロークを描画する際の属性について述べる。

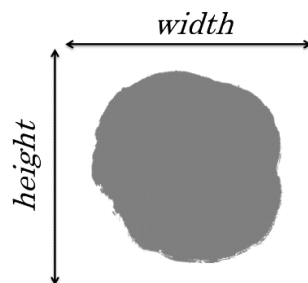


図 5.11 ブラシストロークテクスチャ

Fig.5.11 The texture of the brush stroke

配置, 色: 純色の点描は 5.2.2 項, 補色の点描は 5.2.3 項で決定した位置と色で描画する.

大きさ:

純色の点描: ストロークの大きさには 5.2.2.1 目で説明した Boundary Sampling の円の半径 r を用いる. 実際の点描は一つひとつ手で描くため, 大きさは全く同じにはならない. そこで, 入力画像の輝度値を基に次式により, 円の半径 r の大きさを r' に変更する.

$$r' = r_{min} + \frac{(r_{max} - r_{min})(255 - I_{original})}{255} \quad (5.10)$$

ここで, $r_{max} = \alpha_p r$, $r_{min} = \beta_p r$ で計算する. α_p と β_p はパラメータである. I_{origin} は点を描画する位置の入力画像の輝度値である. I_{origin} の値に応じて, $r_{min} \leq r \leq r_{max}$ の範囲で r' が変更される. 図 5.11 のテクスチャを $width = 2r'$, $height = 1.5width$ に拡大縮小する.

補色の描画: 補色の点描の場合, 純色の点描に比べ点の密度が粗になる. そのため, Boundary Sampling の円の半径 r を大きくしてサンプリングする必要がある. そこで, サンプリング用の円の半径 r_s とは別に半径 r_c を定義する. r_c を式 (5.10) により $r_{min} \leq r_c \leq r_{max}$ の範囲で変更する. ここで, $r_{max} = \alpha_c r_c$, $r_{min} = \beta_c r_c$ で計算する. α_c と β_c はパラメータである

向き: スーラは点をモチーフの輪郭に沿って描いている. したがって, テクスチャは入力画像のエッジに沿った向きで描画することが望ましい. これを実現するために, テクスチャの向きを Edge tangent flow (ETF)[52] を用いて決定する. ETF は, 画像の輝度勾配をエッジの流れに沿って整えることができる.

描画順序: エボシュの上に純色の点描を行う. さらにその上から補色の描画を行う.

5.3 実験結果

提案手法の有効性を検証するために，2次元の入力画像から点描画風画像を生成する実験を行った．

5.3.1 点描画風画像の生成

図 5.12 に提案手法による点描画風画像の生成結果を示す．



(a) 原画像

(1200 × 800 画素)

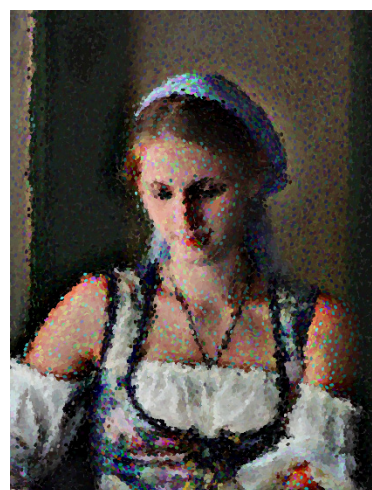


(b) 原画像

(900 × 1200 画素)



(c) (a)から生成した結果



(d) (b)から生成した結果

図5.12 提案手法による点描画風画像の生成例

Fig.5.12 Results of our pointillistic image generation method

表 5.1 提案手法で使用するパラメータの一覧

Table 5.1 Parameter used in proposed method

パラメータ	意味
r	Boundary sampling の円の半径
α_p	式 (5.10) の r_{max} を調整するための項 (点描用)
β_p	式 (5.10) の r_{min} を調整するための項 (点描用)
n_H	量子化する色相数
r_s	Stippling を生成する際の Boundary sampling の円の半径
G_-, G_+	Stippling の密度をコントロールするための項 (式 5.9)
α_c	式 (5.10) の r_{max} を調整するための項 (補色の描画用)
β_c	式 (5.10) の r_{min} を調整するための項 (補色の描画用)
r_c	補色用のストロークテクスチャの基本サイズ

表 5.1 に、提案法で使用するパラメータの一覧を示す。パラメータの値を次のように表記する。点描ハーフトーニングのパラメータを $P(0.003, 1.5, 1.2, 11)$ と表記した場合、 $r = 0.003$, $\alpha_p = 1.5$, $\beta_p = 1.2$, $n_H = 11$ を意味する。補色描画用の Stippling のパラメータを $P_c(0.012, 10, 5, 1.2, 1.0, 0.003)$ とした場合は、 $r_s = 0.012$, $G_- = 10$, $G_+ = 5$, $\alpha_c = 1.2$, $\beta_c = 1.0$, $r_c = 0.003$ を意味する。

図 5.12 (c) は、 $P(0.003, 1.7, 1.3, 11)$, $P_c(0.008, 10, 10, 1.5, 1.2, 0.003)$ で、同図 (a) から生成した点描画風画像の生成結果である。図 5.12 (d) は、 $P(0.003, 1.7, 1.4, 11)$, $P_c(0.008, 5, 5, 1.5, 1.2, 0.0025)$ で、同図 (b) から生成した結果である。

5.3.2 スーラの点描画の再現性

図 5.13 は、提案手法によるスーラの点描画の特徴の再現性を示した結果である。図 5.13 (a) は、 $P(0.002, 1.7, 1.5, 11)$, $P_c(0.007, 10, 10, 1.6, 1.4, 0.002)$ で生成した結果である。図 5.13 (b), (c), (d) は、同図 (a) の一部を拡大したものである。図 5.13 (b) より、異なる鮮やかな色が並置されていることがわかる。図 5.13 (c) を見ると、影になる部分に多く補色が配置されていることがわかる。図 5.13 (d) より、Halo が表現できていることがわかる。



(a)点描画風画像 (b)視覚混合 (c)補色対比 (d)Halo効果
(1600 × 1067 画素)

図.5.13 スーラの点描画の特徴の再現性

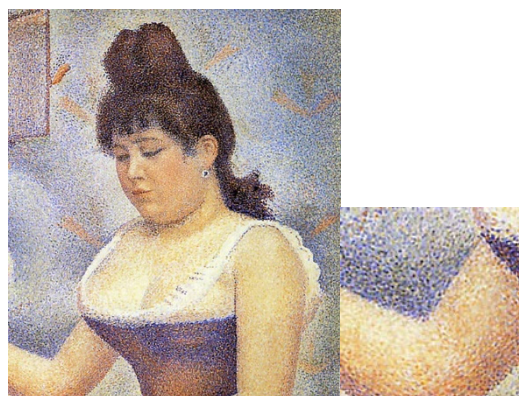
Fig.5.13 Characteristics of Seurat's pointillism mimicked by the proposed method

5.3.3 実際のスーラの作品との比較

図 5.14 に、実際のスーラの点描画と提案手法により生成された点描画風画像を示す。図 5.14 (a) と (b) では Halo 効果を、同図 (c) と (d) では視覚混合を比較した。これらの比較により、提案手法がスーラの画風を再現できていると考える。



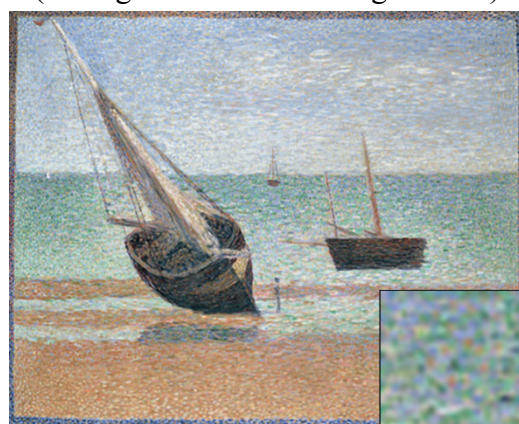
(a)点描画風画像 (Lenna)



(b)スーラの作品
(Young Woman Powdering Herself)



(c)点描画風画像 (Ship)



(d)スーラの作品
(Low tide at grandcamp)

図 5.14 スーラの作品と提案手法の比較

Fig.5.14 Comparison with actual Seurat's paintings

5.3.4 パラメータが生成結果に与える影響

提案手法では、パラメータを変更することで、生成結果の印象を変更することができる。図 5.15 にパラメータを変更して生成した点描画風画像の例を示す。図 5.15 (a) は原画像である。図 5.15 (b), (c), (e) は描画するテクスチャのサイズと密度を変更し、その他のパラメータを固定して生成した結果である。点の大きさと密度は、視覚混合に影響する重要なパラメータである。図 5.15 (d), (e), (f) は使用する色数 (色相の数) を、それぞれ 11 色, 24 色, 72 色と変更して生成した結果である。少ない色数でも、入力画像の諧調を再現できていることがわかる。



(a) 原画像 (1400 × 937 画素)



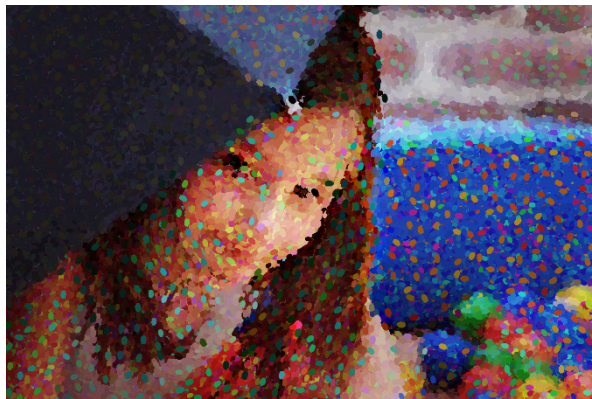
(d) $P(0.0015, 1.8, 1.3, 11)$,
 $P_c(0.008, 5, 5, 1.7, 1.2, 0.0015)$



(b) $P(0.003, 1.8, 1.3, 24)$,
 $P_c(0.009, 5, 5, 1.7, 1.2, 0.003)$



(e) $P(0.0015, 1.8, 1.3, 24)$,
 $P_c(0.008, 5, 5, 1.7, 1.2, 0.0015)$



(c) $P(0.005, 1.8, 1.3, 24)$,
 $P_c(0.015, 5, 5, 1.7, 1.2, 0.005)$



(f) $P(0.0015, 1.8, 1.3, 72)$,
 $P_c(0.008, 5, 5, 1.7, 1.2, 0.0015)$

図 5.15 様々なパラメータで生成した点描画風画像

Fig.5.15 Results with various parameters

パラメータの適正值について議論する．最も生成結果の見た目に影響を与えるパラメータは，Boundary sampling の半径 r である．経験的に， r の値は 0.002 から 0.003 程度にすると，良好な結果が得られる．スーラは補色の点は，純色の点より小さく描いている．そのため，補色の描画サイズ r_c は，純色の描画サイズ r より小さくすることが望ましい．また， $\alpha_p=1.7$ ， $\beta_p=1.4$ 程度が妥当だと考える． r_c と同様の理由により， α_c と β_c は， α_p と β_p より小さくするとよい．また， r_s は 0.007 ～ 0.008 程度が妥当である．

5.3.5 従来手法との比較

図 5.16 に，従来手法との比較結果を示す．図 5.16 (a) は原画像，同図 (b) は Yang ら [48] の結果，同図 (c) は Seo ら [49] の結果，同図 (d) は提案手法による点描画風画像の生成結果である．図 5.16 (d) のパラメータは， $P(0.0025, 1.8, 1.4, 11)$ ， $P_c(0.008, 5, 5, 1.7, 1.3, 0.0025)$ とした．提案法では，11 の色相で生成しているが，従来法は 72 の色相で生成している．

表 5.2 に，図 5.16 で示した提案手法・従来手法による点描画風画像と原画像との，ピーク信号対雑音比 (PSNR) の値を示す．PSNR 値は次式で計算した．

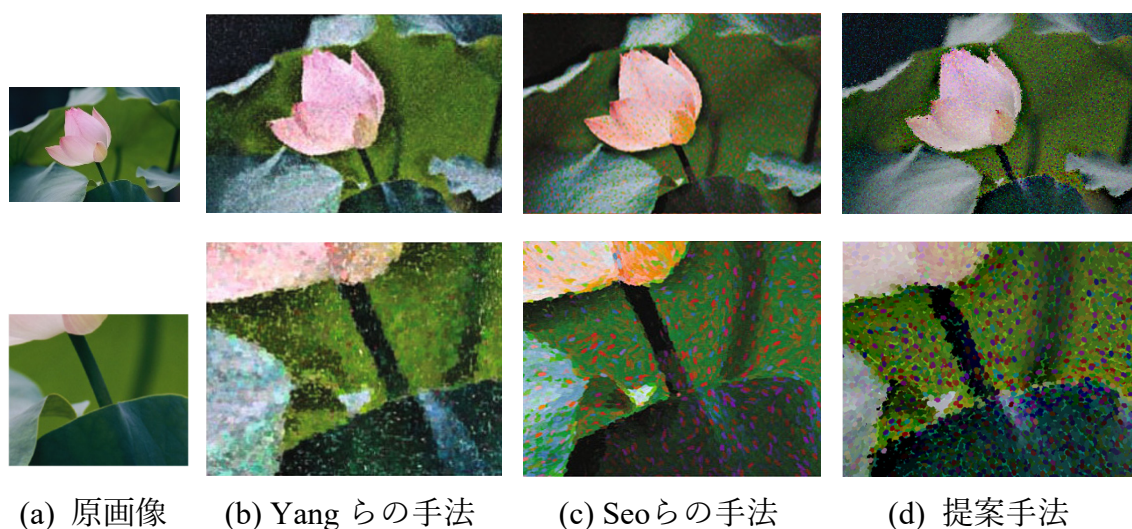


図5.16 従来法との比較

Fig.5.16 Comparison with conventional methods

$$PSNR = 10\log_{10} \frac{255^2}{\sigma} \quad (5.11)$$

σ は次式で求める.

$$\sigma = \frac{1}{3wh} \sum_{i=0}^{w-1} \sum_{j=0}^{h-1} [R(i,j) - \tilde{R}(i,j) + G(i,j) - \tilde{G}(i,j) + B(i,j) - \tilde{B}(i,j)]^2 \quad (5.12)$$

ここで, w と h は, 画像の横幅と高さ表す. $R(i,j)$, $G(i,j)$, $B(i,j)$ は画素 (i,j) における原画像の RGB 値, $\tilde{R}(i,j)$, $\tilde{G}(i,j)$, $\tilde{B}(i,j)$ は画素 (i,j) における点描画風画像の RGB 値である.

提案手法では, 色相数が 11, 24, 72 の場合について, PSNR を求めた. 表 5.3 より, 提案手法では使用する色相の数が多いほど, PSNR の結果がよくなっている. これは, 使用する色相の数が多いほど, 原画像の諧調を再現できていることを表す.

従来手法では 72 の色相数を用いているが, 提案手法の 11 色相数の方がよい結果となっている. 提案法は, 点描ハーフトーニング法により, 少ない色数でも原画像の諧調を良好に再現できるといえる.

表.5.2 提案法と従来法の PSNR の比較

Table 5.2 Comparison of PSNR values between proposed method and previous methods

手法		PSNR (dB)
Yang らの手法		18.5
Seo らの手法		20.1
提案手法	11 色相数	20.3
	24 色相数	21.4
	72 色相数	21.9

5.4 まとめ

2次元の入力画像からスーラの画風を考慮した点描画風画像を生成する手法を提案した。提案手法によりスーラの点描画の特徴である、視覚混合、補色対比、Halo 効果を表現することが可能となった。特に、Boundary Sampling の空間的データ構造を用いて、ランダム、かつ、均等に配置された点に対して誤差拡散法を適応する点描ハーフトーニング法を提案した。これにより、少ない色数で良好な視覚混合を行えるようになった。いくつかの実験により、提案手法の有効性を示した。

点の間隔と大きさ、さらに、ユーザが点描画を見る距離によって、視覚混合の結果に影響を与える。良好な視覚混合を実現するために、これらの関係について明らかにする必要がある。同様に、補色対比の効果を最大限発揮するための補色の大きさや密度の関係についても明らかにしていきたい。また、より効果的に補色で陰影を表現するために Intrinsic image [69] を用いて抽出した shading 成分に対しアンシャープマスクを適用することも考えられる。2次元画像を入力とする場合、奥行情報が得られないなど、画像から得られる情報量に限界があるため、3次元モデルを入力することも検討していきたい。

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

本論文では、ブラシストロークモデルに基づいて、様々な絵画風画像を生成する手法を提案した。Scalable Poisson Disk Sampling 法を用いることで、ストロークの配置、属性、描画順序を効果的に決定できることを示した。さらに、RGB カラーモデルと RYB カラーモデルの相互変換式を提案した。これにより、絵具の混色に近い結果を得ることができるようになった。最後にスーラの色彩理論・技法を考慮した点描画風画像生成手法を提案した。点描ハーフトーニング法により、良好な視覚混合を実現可能であることを示した。

テーマごとには、以下の結論を得た。

(1) Scalable Poisson Disk Sampling に基づく様々な画風の絵画風画像生成法

本研究により、1つの入力画像から様々な画風の絵画風画像を自動生成することが可能となった。具体的には、貼り絵、水彩画、油絵の各絵画風画像を生成できていることを確認した。Scalable Poisson Disk Sampling を用いることで、ストロークの配置や属性をパラメータによりコントロールすることが可能となった。これにより、様々なバリエーションや画風に応じたストロークの描画が可能となった。

(2) RYB カラーモデルとその応用

RGB 色空間と RYB 色空間の相互変換式を提案した。また、RYB 色空間上での混色法についてもあわせて検討を行った。実験により、その有効性を検証した。これにより、コンピュータで RYB カラーモデルを容易に使用することが可能となった。RYB カラーモデルを、ストロークの混色を考慮した水彩画風画像生成法、色の指定インタフェース、可視化などへ応用し、RYB カラーモデルをコンピュータで利用することの有用性が示された。

(3) スーラの画風を模擬した点描画風画像の自動生成

スーラの色彩理論に基づく点描画風画像を生成することが可能となった。ランダムに配置された点に誤差拡散法を適用する、点描ハーフトニング法を提案した。これにより少ない色数で効果的な視覚混合を実現可能となった。また、点描ハーフトニング法を、Stippling が生成できるように拡張し、補色による陰影表現を実現した。さらに、拡張アンシャープマスクにより自然な Halo が生成できるようになった。

6.2 今後の課題

Scalable Poisson Disk Sampling 法はブラシストロークの配置や属性を良好に決定できる利点があるが、サンプリングに時間がかかるという弱点がある。今後の課題として、Scalable Poisson Disk Sampling 法の高速化が挙げられる。また、スマートフォンでも利用できるように、省メモリ化も考慮する必要がある。

RYB カラーモデルをコンピュータで利用できるようにしたことは、様々な分野において寄与が大きいと考えている。特に、RYB カラーモデルは、直感的な混色を実現できるため、色を用いた可視化手法と親和性が高いと考えられる。今後は、可視化をはじめとした RYB カラーモデルのさらなる活用方法について、検討を進めたい。

本研究では、静止画を入力として扱ったが、提案手法を発展させ、アニメーションへ対応させることも今後の課題である。

2次元画像は奥行き情報を持たないため、物体の陰影の抽出や分割などが難しい。今後は、3次元モデルを入力とした手法も検討していきたいと考えている。

6.3 本研究の商用利用

第3章で提案した絵画風画像の生成手法は、株式会社オレンジアーチから“絵画風画像変換ライブラリ [70] ”として、サービス化されている。

付録 A

RGB 色空間から RYB 色空間への変換式の導出詳細

本付録では、第 4 章で提案した RGB 色空間 RYB 色空間への変換式 (4.5) ～ (4.7) の導出の詳細を説明する。赤、緑、青の 3 軸からなる RGB 立方体を、赤、黄、青の 3 軸からなる RYB 立方体へ変換することを考える。

Walther [71, 72] により、RGB 色空間における黄は以下のように定義されている

$$y_{RGB} = \min\{r_{RGB}, g_{RGB}\} \quad (\text{A.1})$$

RYB 色空間では、黄の量は、黄軸により表現される。したがって、RGB 色空間の赤と緑から、次式の通り黄を減算する必要がある。

$$r_{RYB} = r_{RGB} - y_{RGB} \quad (\text{A.2})$$

$$g'_{RGB} = g_{RGB} - y_{RGB} \quad (\text{A.3})$$

式 (A.1) を式 (A.2) に代入することで、式 (4.5) を得る。

赤と緑を加算したときに、加算後の値が取り得る値の最大値から溢れないよう次式の通り、半分にする。

$$b'_{RGB} = \frac{b_{RGB}}{2} \quad (\text{A.4})$$

$$g''_{RGB} = \frac{g'_{RGB}}{2} \quad (\text{A.5})$$

RYB 色空間において、緑は、青と黄により表現される。残りの緑を、黄と青に分配すると次のようになる。

$$y_{RYB} = y_{RGB} + g''_{RGB} \quad (\text{A.6})$$

$$b_{RYB} = b'_{RGB} + g''_{RGB} \quad (\text{A.7})$$

式 (A.1) と 式 (A.5) を式 (A.6) に代入することで, 式 (4.6) を得る. 式 (A.4) と 式 (A.5) を式 (A.7) に代入することで, 式 (4.7) を得る.

第 4 章の式 (4.20) ～ 式 (4.22) の RYB 色空間から RGB 色空間への変換もこれと同様の考え方で導出される.

付録 B

多様なストロークと RYB カラーモデルによる混色に基づく

水彩画風画像生成法

B.1 はじめに

本付録では，第 3 章で提案した水彩画風画像生成法を，多様な長さのストロークで生成できるように改良する．さらに，ストロークが重なった部分の混色を RYB カラーモデルに基づいて表現する．

Scalable Poisson Disk Sampling (SPDS) 法により配置された円を図 B.1 (a) に示すテクスチャを縮小して置き換えることでショートストロークを，最近傍の 2 つの円を結ぶ線分上に同じテクスチャを配置することでロングストローク描を表現する．

結ぶ円の数を変更することでストロークの長さを，円の半径 r の大きさを変更することでストロークの太さを制御可能な水彩画風画像を生成できることを実験により示す．

B.2 提案手法

ショートストロークとロングストローク描で描き分ける処理の流れを Step (1) ～ (8) に示す．

Step1: SPDS 法により配置されたすべての円から処理の対象となる円をひとつ選び，これを注目円と呼ぶ．また，注目円以外の円を候補円と呼ぶ．

- Step2: 注目円と候補円の半径の差が閾値 $\angle r$ 以上の場合、候補円から除外する。
- Step3: 注目円の中心の画素と Step2 で残った候補円の中心の画素について色差 C_1 を求める。色差 C_1 が閾値 e 以下であれば候補円として残し、そうでなければ候補円から除外する。
- Step4: 注目円と Step3 で残った候補円の中心位置の市街地距離 d を求め、距離 d が一番近い候補円を求める。
- Step5: 注目円と Step4 で求めた候補円のそれぞれの中心を結ぶ線分上の画素を 1 画素ずつ走査する。走査している画素と注目円の中心の画素との色差 C_2 を求める。求めた色差 C_2 がある閾値 t 以下の場合、2 つの円の間に変化が大きい領域が存在しないと判断する。この場合はロングストロークを描画する。注目円と候補円を結ぶように、ロングストローク用のテクスチャ (図 B.1 (b)) を拡大縮小したテクスチャをマッピングする。
- Step6: 閾値 t 以上の場合、ロングストロークの描画は行わず、ショートストロークを描画する。ショートストロークの場合は、注目円の半径の大きさに合わせてショートストローク用のテクスチャ (図 B.1 (a)) を拡大縮小してマッピングする。処理後、Step1 に戻る。
- Step7: これまでに注目円と候補円とを結んで描画した回数が指定された回数 n 以上の場合、処理を終了し、Step1 へ戻る。指定された回数が n 以下の場合、候補円を注目円として、Step2 へ戻る。
- Step8: ステップ 1~7 を全ての円に対して行う。

結ぶ円の数 n によりストローク描の長さを、円の半径の最大値 r_{max} によりストロークの太さを制御可能となる。

また、ストロークが重なった部分を RYB カラーモデルに基づいて混色する。ここでは、重み付き加算法を用いて混色した。

ストロークを描画した画像に、画用紙の凹凸、色のにじみ、原画像から抽出したエッジを合成する水彩画風画像を生成する。



(a) ショートストロークテクスチャ



(b) ロングストロークテクスチャ

図 B.1 テクスチャ

B.3 実験結果

入力画像から水彩画風画像を生成する実験を行った．図 B.2 (a) の入力画像から生成した水彩画風画像を同図 (b), (c), (d) に示す．B.2 (b) は RYB カラーモデルによる減法混色処理を行わないで生成した結果，同図 (c), (d) は減法混色処理を行って生成した結果である．図 B.2 (c), (d) よりストロークが重なった部分が減法混色により色が変化していることがわかる．図 B.2 (c) はストロークの色を単純加算して描画した結果であり，入力画像の色よりかなり暗くなっている．図 B.2 (d) はそれを緩和するために，重み付き加算法を用いて，色を加算して描画した結果である．同図 (c) に比べて自然な結果となっていることがわかる．



(a) 原画像



(b) 水彩画風画像 (混色無し)



(c) 水彩画風画像
(混色有り, 単純加算)



(d) 水彩画風画像
(混色有り, 重み付き加算法)

図 B.2 水彩画風画像生成例

B.4 まとめ

ストローク長や太さの異なる多様なストローク描が可能な水彩画風画像生成法を提案した. さらに, RYB カラーモデルに基づいてストロークが重なった部分の混色を行った. これにより, 実際の水彩画に近い表現が可能となった.

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心に御指導，御鞭撻頂きました東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科 高橋 時市郎 教授に深く感謝致します。

本論文の副査として，東京電機大学 システムデザイン工学部 デザイン学科 齊藤 剛 教授，東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科 鉄谷 信二 教授，東京電機大学 工学部 情報通信工学科 長谷川 誠 教授には貴重なコメントとアドバイスを頂きました。記して感謝致します。

東京電機大学 東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科 森谷 友昭 助教，東京医療保健大学 医療保健学部 医療情報学科 金澤 功尚 助教には，熱心に御討論，御意見，御協力を頂きました。記して感謝致します。

東京電機大学 未来科学部 情報メディア学科 師井 聡子 元講師には，視覚混合について御教授頂きました。記して感謝致します。

本論文の一部は，東京電機大学大学院 工学研究科 情報メディア学専攻 修士課程に，筆者が在籍していた当時の研究グループでの共同研究による成果です。水彩画の研究成果は島影 佳範氏，油絵の研究成果は高橋（旧姓田鎖）由莉氏との共同研究によるものです。彼らとの共同研究を通じて，多くの成果を挙げることができました。深く感謝致します。また，本研究に対して，熱心に御討論，御意見頂きました，ビジュアルコンピューティング研究室諸氏，なかでも NPR 班の皆様に感謝いたします。

本研究の一部は，アストロデザイン株式会社の支援によるものです。記して感謝致します。

日頃ご支援賜る，東京医療保健大学 医療保健学部 医療情報学科の諸先生方に感謝致します。

最後に，筆者の研生活を支えて下さった家族に感謝致します。

参考文献

- [1] T. Whitted: “An Improved Illumination Model for Shaded Display”, Communications of the ACM, Vol. 23, No. 6, pp. 343-349, 1980.
- [2] C. Reynolds: Stylized Depiction in Computer Graphics, <http://www.red3d.com/cwr/npr/>
- [3] 斎藤隆文, “ノンフォトリアリステック・レンダリング”, 日本印刷学会誌, Vol. 51, No. 4, pp. 262-267, 2014.
- [4] T. Saito and T. Takahashi: “Comprehensible Rendering of 3-D Shapes”, Computer Graphics (Proc. of ACM SIGGRAPH '90), Vol. 24, No. 4, pp. 197-206, 1990.
- [5] B. J. Meier: “Painterly Rendering for Animation”, Proc. of ACM SIGGRAPH 1996, pp. 477-383, 1996.
- [6] M. Shiraishi and Y. Yamaguchi: “An Algorithm for Automatic Painterly Rendering Based on Local Source Image Approximation”, Proc. of the 1st International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering (NPAR '00), pp.53-58, 2000.
- [7] A. Hertzmann: “Painterly Rendering with Curved Brush Strokes of Multiple Sizes”, Proc. of ACM SIGGRAPH '98, pp. 453-460, 1998.
- [8] C.J. Curtis, S.E. Anderson, J.E. Seims, K.W. Fleischer and D.H. Salesin: “Computer-Generated Watercolor”, Proc. of ACM SIGGRAPH '97, pp. 421-430, 1997.
- [9] A. Bousseau, M. Kaplan, J. Thollot and F. Sillion: “Interactive Watercolor Rendering with Temporal Coherence and Abstraction”, Proc. of the 4th International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering (NPAR '06), pp. 141-149, 2006.
- [10] M. Salisbury, M. Wong, J. Hughes and D. Salesin: “Orientable Textures for Image-based Pen-and-ink Illustration”, Proc. of ACM SIGGRAPH '97, pp. 401-406, 1997.
- [11] 高木佐恵子, 藤代一成, 中嶋正之: “色えんぴつ画周辺技法のボリュームレンダリング”, 情報処理学会論文誌, Vol. 41, No. 3, pp. 616-624, 2000.
- [12] V. Ostromoukhov: “Digital Facial Engraving”, Proc. of ACM SIGGRAPH '99, pp. 417-424, 1999.

- [13]D. Tasaki, M. Katou, S. Mizuno and M. Okada: “Physical Model to Achieve Virtual Mezzotint”, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 5, pp. 2012-2022, 2007.
- [14]F. Ritter, C. Hansen, V. Dicken, O. Konrad, B. Preim and H.O. Peitgen: “Real-Time Illustration of Vascular Structures”, IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol. 12, No. 5, 2006.
- [15]森谷友昭, 高橋時市郎: “剛体の運動の非写実的表現技術”, 画像電子学会誌, Vol. 38, No. 2, pp. 114-121, 2009.
- [16]S. Hegde, C. Gatzidis and Feng Tian: “Painterly Rendering Techniques: A State-of-the-art Review of Current Approaches”, Computer Animation and Virtual Worlds, Vol. 24, No. 1, pp. 43-64, 2013.
- [17]P. Haeberli: “Paint by Numbers: Abstract Image Representation”, Computer Graphics (Proc. of ACM SIGGRAPH '90), Vol. 24, No. 4, pp. 207-214, 1990.
- [18]I. Newton, Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light, S. Smith and B. Walford, London, 1704.
- [19]J. Goethe, Zur Farbenlehre, J.G. Cotta, Tübingen, 1810.
- [20]M.E. Chevreul, The Principles of Harmony and Contrast of Colors, SCHIFFER Publishing, Atglen, 1987.
- [21]O.N. Rood, Modern Chromatics, with Applications to Art and Industry, Appleton, New York, 1879.
- [22]J. Itten, The Art of Color: the Subjective Experience and Objective Rationale of Color, Van Nostrand Reinhold, New York, 1973.
- [23]H. Dutching, Georges Seurat: 1859-1891: The Master of Pointillism (Taschen Basic Art Series), TASCHEN Japan, 2000.
- [24]POLA Museum of Art, Sparks of Color: Pointillism and Fauve Paintings from the Collection, POLA museum of Art, POLA Foundation, Japan, 2004.
- [25]M. Luboschik, H. Schumann: “Illustrative Halos in Information Visualization”, Proc. of the International Working Conference on Advanced Visual Interfaces 2008 (AVI '08), pp. 28-30, 2008.
- [26]T. Luft, C. Colditz and O. Deussen: “Image Enhancement by Unsharp Masking the Depth

- Buffer”, ACM Trans. on Graphics (ACM SIGGRAPH ’06), Vol. 25. No. 3, pp. 1206-1213, 2006.
- [27] S. Seo, S. Kim, Y. Park and K. Yoon: “Colored-Paper Mosaic Rendering”, Proceedings of ACM SIGGRAPH ’01 Sketches & Applications, p. 157, 2001.
- [28] S. Seo, D. Kang, Y. Park and K. Yoon: “The New Area Subdivision Methods for Producing Shapes of Colored Paper Mosaic”, Proc. of the 2002 International Conference on Computational Science (ICCS ’02), pp. 32-41, 2002.
- [29] 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”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. 88-D2, No. 2, pp. 358-367, 2005.
- [30] K. Perlin: “An Image Synthesizer”, Computer Graphics (Proc. of ACM SIGGRAPH ’85), Vol. 19, No. 3, pp. 287-296, 1985.
- [31] A. Hausner: “Simulating Decorative Mosaics”, Proc. of ACM SIGGRAPH ’01, pp. 573-580, 2001.
- [32] J. Kim and F. Pellacini: “Jigsaw Image Mosaics”, ACM Trans. on Graphics (Proc. of ACM SIGGRAPH ’02), Vol. 21, No. 3, pp. 657-664, 2002.
- [33] 井上光平, 浦浜喜一: “画像の色円板分布近似に基づく貼り絵風画像の生成”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 58, No. 10, pp. 1516-1518, 2004.
- [34] 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, Vol. J88-A, No. 11, pp. 1376-1380, 2005.
- [35] 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”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 12, pp. 2038-2041, 2006.
- [36] P. Kubelka and F. Munk: “Ein Beitrag Zur Optik Der Farbanstriche”, Zeitschrift für Technische Physik, 12, pp. 593-601, 1931.
- [37] ヘンリー・ジョハン, 橋本良太, 西田友是: “描画技法を考慮した水彩画風画像の生成”, 芸術科学会論文誌, Vol. 3 No. 4, pp. 207-215, 2004.
- [38] N. Gossett and B. Chen: “Paint Inspired Color Mixing and Composit-ing for Visualization”, Proc. of the IEEE Symposium on Information Visualization 2004 (InfoVis ’04), pp. 113-118, 2004.

- [39]H. H. Shenan and V. Interrante: “Compositing Color with Texture for Multi-variate Visualization”, Proc. of 3rd International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques in Australasia and Southeast Asia (GRAPHITE '05), pp. 443-446, 2005.
- [40]M. Constable and X. Zhang: “Depth-based Analyses of Landscape Paintings and Photographs According to Itten’s Contrasts”, Proc. of the 5th Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT 2010), pp. 481-486, 2010.
- [41]X. Zhang, M. Constable and H. Ying: “On the Transfer of Painting Style to Photographic Images through Attention to Colour Contrast”, Proc. of the 5th Pacific-Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT 2010), pp. 414-421, 2010.
- [42]C. Blanc, *The Grammar of Painting and Engraving*, The Riverside Press, Cambridge, 1874.
- [43]J. Hays and I. Essa: “Image and Video Based Painterly Animation”, Proc. of the 3rd International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering (NPAR 2004), pp. 113-120, 2004.
- [44]T.Q. Luong, A. Seth, A. Klein and J. Lawrence: “Isoluminant Color Picking for Non-photorealistic Rendering”, Proc. of Graphics Interface '05, pp. 233-240, 2005.
- [45]L. Jing, K. Inoue and K. Urahama: “An NPR Technique for Pointillistic and Mosaic Images with Impressionist Color Arrangement”, Proc. of the International Symposium on Visual Computing (ISVC '05), pp. 1-8, 2005.
- [46]A. Hausner: “Pointillistic Halftoning”, Proc. of Computer Graphics and Imaging (CGIM '05), pp. 134-139, 2005.
- [47]Q. Du and D. Wang: “The Optimal Centroidal Voronoi Tessellations and the Gershgorin's Conjecture in the Three-Dimensional Space”, *Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 49, No. 9-10, pp. 1355–1373, 2005.
- [48]C.K. Yang and H.L. Yang: “Realization of Seurat's Pointillism via Non-photorealistic Rendering”, *The Visual Computer*, Vol. 24, No. 5, pp. 303-322, 2008.
- [49]S.H. Seo and K.H. Yoon: “Color Juxtaposition for Pointillism Based on an Artistic Color Model and a Statistical Analysis”, *The Visual Computer*, vol. 26, No. 6-8, pp. 421-431, 2010.
- [50]M. McCool and E. Fiume: “Hierarchical Poisson Disk Sampling Distribution”, Proc. of

- Graphics Interface '92, pp. 94-105, 1992.
- [51] N.A. Ibraheem, M.M. Hasan, R.Z. Khan and P.K. Mishra: "Under-standing Color Models: A Review", ARPN Journal of Science and Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 265-275, 2012.
- [52] H. Kang, S. Lee and C. Chui: "Flow-based Image Abstraction". IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, Vol. 15, No. 1, pp. 62-76, 2009.
- [53] P. Litwinowicz: "Processing Images and Video for an Impressionist Effect", Proc. of ACM SIGGRAPH '97, pp. 407-414, 1997.
- [54] キース・ホーガン, パターンライブラリー -世界の実用文様集, ビー・エヌ・エヌ新社, 2005.
- [55] 金城龍男, プロが明かす水彩画のコツ, 永岡書店, 2006.
- [56] T. Porter, T. Duff: "Compositing Digital Images", Computer Graphics, Vol. 18, No. 3, pp. 253-259, 1984.
- [57] J. Zack, ColorMine.org, <http://colormine.org/>, accessed Mar. 1, 2017.
- [58] J. Lu, S. DiVerdi, W. Chen, C. Barnes and A. Finkelstein: "RealPigment: Paint Compositing by Example," Proc. of International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering (NPAR 2014), pp. 21-30, 2014.
- [59] A. R. Robertson: "Historical Development of CIE Recommended Color Difference Equations", Color Research & Application, Vol. 15, No. 3, pp. 167-170, 1990.
- [60] Adobe Systems, Adobe Photoshop, <http://www.adobe.com/jp/products/photoshop.html>, accessed Mar. 1, 2017.
- [61] Microsoft, Microsoft Office, <https://products.office.com/ja-JP/>, accessed Mar. 1, 2017.
- [62] Z. Chen, B. Kim, D. Ito, H. Wang, Wetbrush: "GPU-based 3D Painting Simulation at the Bristle Level", ACM Trans. on Graphics, Vol. 34, No. 6, Article No. 200, 2015.
- [63] R.W. Floyd and L. Steinberg: "An Adaptive Algorithm for Spatial Grey Scale", Proc. of the Society for Information Display (SID '97), Vol. 17, No. 2, pp. 75-77, 1976.
- [64] J. Canny: "A Computational Approach to Edge Detection", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 8, No. 6, pp. 679-698, 1986.
- [65] R.L. Cook: "Stochastic Sampling in Computer Graphics", ACM Trans. Graph., Vol. 5, No. 1, pp. 51-72, 1986.

- [66]D. Dunbar and G. Humphreys: “A spatial data structure for fast Poisson-disk sample generation”, ACM Trans. on Graphics (Proc. of ACM SIGGRAPH ’06), Vol. 25, No. 3, pp. 503-508, 2006.
- [67]A. Secord: “Weighted Voronoi Stippling”, Proc. of the the 2nd International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering (NPAR ’02), pp. 37-43, 2002
- [68]P. Heckbert: “Color Image Quantization for Frame Buffer Display”, Computer Graphics, Vol. 16, No. 3, pp. 297-307, 1982
- [69]R. Grosse, M. Johnson, E. Adelson, and W. Freeman: “Ground Truth Dataset and Baseline Evaluations for Intrinsic Image Algorithms”, Proc. of the IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV ’09), 2009
- [70]ORANGEARCH, 絵画風画像変換ライブラリ, <http://www.orangearch.co.jp/business/npr.php>, accessed Nov. 1, 2017
- [71]D. Walther and C. Koch: “Modeling Attention to Salient Proto-objects”, Neural Networks, Vol. 19, No. 9, pp. 1395-407, 2006
- [72]D. Walther: “Appendix A.2. Color Opponencies for Bottom-up Attention,” In Interactions of Visual Attention and Object Recognition: Computational Modeling, Algorithms, and Psychophysics. Ph.D. thesis, pp. 98-99, 2006

研究業績

査読付き論文 (Journal Papers)

- [JP-1] Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “Computational RYB Color Model and its Applications”, IEEEJ Transactions on Image Electronics and Visual Computing, Vol.5, No.2, pp.110-122 (2017)
- [JP-2] Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “A Method for Generating Pointillism Based on Seurat’s Color Theory”, ITE Transactions on Media Technology and Applications, Vol.1, No.4, pp.317-327 (2013)
- [JP-3] 杉田純一, 高橋時市郎: “階層的 Poisson Disk Sampling 法を用いた貼り絵風画像生成法”, 画像電子学会誌, Vol.36, No.4, pp.407-416 (2007)

国際会議 (International Conferences) いずれも査読有

- [IC-1] Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “A Method to Generate Hybrid Pointillistic Images”, ACM SIGGRAPH ASIA 2015 Posters (2015)
- [IC-2] Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “Paint-like Compositing Based on RYB Color Model”, ACM SIGGRAPH 2015 Posters (2015)
- [IC-3] Shuhei Kodama, Junichi Sugita, Tomoaki Moriya and Tokiichiro Takahashi: “Fast Generation of Various Painterly Style Images Based on Scalable Poisson Disk Pre-Sampling Technique”, Proc. of 2015 Joint Conference of IWAIT and IFMIA (2015)
- [IC-4] Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “RYB Color Compositing”, Proc. of 2015 Joint Conference of IWAIT and IFMIA (2015)
- [IC-5] Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “Pointillistic Halftoning for Generating Seurat’s Pointillism”, Proc. of International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2013), pp. 455-460 (2013)
- [IC-6] Yusuke Hosoi, Junichi Sugita, Yuki Morimoto, Tomoaki Moriya and Tokiichiro Takahashi: “An Image Generation Method for Embroidery from Photograph”, Proc.

of International Workshop on Advanced Image Technology (IWAIT2013), pp. 755-760 (2013)

- [IC-7] Yoshinori Shimakage, Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “An Automatic Generation Method of Watercolor-like Images Considering Color Mixture”, Proc. of Image Electronics and Visual Computing Workshop 2010 (IEVC2010) (2010)
- [IC-8] Yoshinori Shimakage, Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “A Generation Method of Watercolor Images Combining Short and Long Stroke Drawings”, Proc. of ASIAGRAPH 2008 in Tokyo, Vol.2, No.2, pp.58-63 (2008)
- [IC-9] Kunie Suganuma, Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “Colorization using Harmonic Templates”, ACM SIGGRAPH2008 Posters, No. 62 (2008)
- [IC-10] Yoshinori Shimakage, Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “A Method of Generating Watercolor Images Combining Short and Long Stroke Drawings”, ASIAGRAPH 2008 in Shanghai Posters (2008)
- [IC-11] Junichi Sugita and Tokiichiro Takahashi: “A Generation Method for Pointillistic Images Considering both Optical Mixture and Complementary Color Contrast”, International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering (NPAR 2007) Posters (2007)
- [IC-12] Junichi Sugita, Tokiichiro Takahashi and Akimichi Tanaka: “Visionary Mixture Method for Generating Colored-Paper Mosaic Images”, ACM SIGGRAPH 2006 Research Posters, No. 115 (2006)

国内会議 (Domestic Conferences)

シンポジウム (査読有)

- [DC-1] 杉田純一, 高橋時市郎: “色紙の重なりを考慮した貼り絵風画像生成法”, Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2006 予稿集, pp.201-206 (2006)

シンポジウム (査読無)

- [DC-2] 杉田純一, 高橋時市郎: “視覚混合に基づくハイブリッド点描画”, Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2015 (2015)

研究会

- [DC-3] 杉田純一, 高橋時市郎: “RGB-RYB 色空間変換法”, 画像電子学会第 280 回研究会講演予稿, pp.63-68 (2017)
- [DC-4] 小玉周平, 杉田純一, 森谷友昭, 高橋時市郎: “Scalable Poisson Disk Pre-Sampling 法による絵画風画像の高速生成”, 画像電子学会第 271 回研究会講演予稿 (2014)
- [DC-5] 杉田純一, 島影佳範, 田鎖由莉, 高橋時市郎: “階層的 Poisson Disk Sampling 法を用いた様々な絵画風画像の生成法”, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.107, No.486, pp.1-6 (2008)
- [DC-6] 杉田純一, 高橋時市郎: “補色対比を考慮した筆触分割による点描画風画像生成法”, 情報処理学会研究報告, グラフィクスと CAD 研究会, Vol.2007, No.13, pp.91-96 (2007)

筆頭著者

- [DC-7] 杉田純一, 島影佳範, 高橋時市郎: “水彩画風画像生成のための RYB カラーモデルに基づく混色法”, 画像電子学会第 41 回年次大会予稿集, R1-4 (2013)
- [DC-8] 杉田純一, 高橋時市郎: “Boundary Sampling を用いた点描ハーフトーニング”, 画像電子学会第 40 回年次大会予稿集, R6-3 (2012)
- [DC-9] 杉田純一, 田鎖由莉, 高橋時市郎: “ブラシストローク型 NPR のための輝度勾配補間法”, 電子情報通信学会総合大会 2008 講演論文集, D-11-96 (2008)
- [DC-10] 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, pp.381-382 (2007)
- [DC-11] 杉田純一, 高橋時市郎: “階層的 Poisson Disk Sampling 法を用いた貼り絵風画像生成法の改良”, 電子情報通信学会総合大会 2007 講演論文集, D-11-69(2007)
- [DC-12] 杉田純一, 高橋時市郎: “視覚混合を考慮した貼り絵風画像生成法”, FIT2006 (第 5 回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, J-039 (2006)

- [DC-13] 杉田純一, 高橋時市郎: “階層的 Poisson Disk Sampling 法を用いた貼り絵風画像生成法”, 電子情報通信学会総合大会 2006 講演論文集, D-12-123 (2006)

共著

- [DC-14] 下岡千幸, 江連佑真, 神立知奈, 黒野由美, 前田梨沙, 水口千歳, 三友咲愛, 山縣俊亮, 山西晴奈, 杉田純一, 日高未希恵, 松本和史, 竹内朋子: “看護学生が行う陰部洗浄における洗い残しの多い部位とその関連要因”, 第 37 回日本看護科学学会学術集会、O13-1 (2017)
- [DC-15] 田鎖由莉, 杉田純一, 高橋時市郎: “絵具の重なりと厚みを考慮した油絵風画像生成法”, 電子情報通信学会総合大会 2008 講演論文集, D-11-95 (2008)
- [DC-16] 島影佳範, 杉田純一, 高橋時市郎: “点描と多様なストローク描による水彩画風画像生成法”, 電子情報通信学会総合大会 2008 講演論文集, D-11-97 (2008)
- [DC-17] 菅沼邦恵, 杉田純一, 高橋時市郎: “Harmonic Template を用いたモノクロ画像のカラー化”, 電子情報通信学会総合大会 2008 講演論文集, D-11-117 (2008)
- [DC-18] 後藤 瞬, 杉田純一, 高橋時市郎: “役者絵版画の色と質感を考慮した浮世絵風画像生成法”, 平成 20 年度電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会講演論文集, p.166 (2008)
- [DC-19] 島影佳範, 杉田純一, 高橋時市郎: “点描とストローク描を組合せた水彩画風画像生成法”, 2007 年映像情報メディア学会冬季大会, 7-3 (2007)
- [DC-20] 田鎖由莉, 杉田純一, 高橋時市郎: “階層的 Poisson Disk Sampling 法を用いた油絵風画像生成法”, 2007 年映像情報メディア学会冬季大会, 7-4 (2007)
- [DC-21] 島影佳範, 杉田純一, 高橋時市郎: “階層的 Poisson Disk Sampling 法を用いた水彩画風画像生成法”, 電子情報通信学会総合大会 2007 講演論文集, D-11-111 (2007)
- [DC-22] 森谷友昭, 杉田純一, 荻原学, 高橋時市郎: “2 台のカメラによるモニタ画面の指差し位置計測”, 画像電子学会第 33 会年次大会予稿集, pp.151-152 (2005)

招待講演 (Invited Talks)

- [IT-1] 高橋時市郎, 中津香奈, 杉田純一: “CG による形の錯視・色の錯視”, 第 5 回錯覚ワークショップ (2012)

報道発表 (Press Releases)

- [PR-1] “デジカメ画像水彩画風に変換 東京電機大、ソフト開発”, 日経産業新聞, 2007 年 1 月 5 日
- [PR-2] 杉田純一, 高橋時市郎, “デジカメ写真を貼り絵風に変換”, 日本工業出版画像ラボ 12 月号, pp.37-41 (2006)
- [PR-3] “デジカメ写真を張り絵風に変換 東京電機大学がソフト開発”, 日経産業新聞, 2006 年 5 月 31 日

表彰 (Award)

- [A-1] 杉田純一, 画像電子学会第 2 回西田賞 (2008)