

顔料及び支持体の特性を考慮したパステル画風レンダリング

村上 恭子

九州芸術工科大学大学院
芸術工学研究科 情報伝達専攻

鶴野 玲治

九州芸術工科大学

Pastel-like Rendering Considering the Properties of Pigments and Support Medium

Kyoko MURAKAMI

Kyushu Institute of Design Graduate School
Division of Audio and Visual Communication Studies

Reiji Tsuruno

Kyushu Institute of Design

本論文では、ノンフォトリアリスティックレンダリング技法の一つの展開として、CGによりパステル画風の画像を生成する技法を提案する。まず三次元オブジェクトをもとに、ベクタ化するための特徴点を抽出し、パステルのストロークモデルを生成する。次に、支持体である紙面の凹凸や、数種類のストローク技法によるパステルへの圧力変化、紙面上の同じ場所に複数の顔料付着した場合の混色などを考慮し、各ストロークごとに顔料の付着モデルを生成する。その後、これらのモデルに対しレンダリングを行う。このようにして得た画像はある程度パステル画らしい特徴と雰囲気を持ったものであると同時に、視点の移動や画角の変化、光源や対象の移動や変形なども自由である。また、顔料の付着率やストロークの幅といったパラメータを変化させたり、レンダリングの際にぼかし効果（ブレンド）を加えることによって、様々な描画効果を得ることができる。

1. はじめに

手描き風の画像のCG表現については、表現力を拡大するのに有用であることからこれまでに様々な画材、例えばペン画 [1] [2]・油彩画 [3] [4]・水墨画・水彩画 [5]・色鉛筆画 [6]・セル画 [7]などを対象とした研究がなされている。元となるデータも、インタラクティブな描画データから、二次元の画像や三次元モデルなど様々である。

パステルという画材は、「パステルカラー」という言葉に代表されるように、柔らかな表現力を持つ。もともとは油絵などの下書きをする画材として補助的に使用されていたものであるが、その表現力の豊かさや柔らかな質感が目され、現在では独自の絵画分野を形成するまでに至っている [8] [9]。

しかしながら、パステル画風のCG表現はこれまでの研究の中では見当たらない。一部の市販ソフトウェアにおいて擬似的に実現されているものの、質感・顔料や紙質の特性による表現効果、三次元CGとしてのレンダリングなどのすべてを満足するにはまだ十分とは言えない。

本研究では三次元モデルのレンダリングにおける新たな技法のひとつとして、パステル画風のノンフォトリアリスティックレンダリング技法を提案する。特にパステルの顔料の特性に焦点を当て、媒体となる紙と

の関係性などを考慮し、パステル画らしい質感の再現を行う。また、描画対象を三次元モデルとして与え、プリプロセスを通常の三次元CGと共通にすることで、さまざまな変換やアニメーションへの適用の可能性も考慮に入れたものである。

次章からは、まず第2章でパステルという画材及びパステル画の特徴について触れた後、第3章では本研究で実装しているパステル画風画像生成アルゴリズムについて説明し、それによって得ることのできる画像を第4章で、その応用例を第5章で示す。最後に第6章で、まとめと考察を行う。

2. パステル画の特徴

本章では、本研究で表現しようとするパステル及びパステル画の構成要素について説明する。

2.1 パステルの特徴

パステルは顔料を固形化したものであり、その主成

パステルの種類	粘着剤の量・質	特徴	主な表現技法
ソフトパステル	ごく微量の粘着剤	非常に柔らかい	ぼかし・広範囲を塗る
ハードパステル	粘着剤の量はやや多め	やや固め、はっきりしたストローク	細部描写・アクセント
セミハードパステル	ソフトパステルとハードパステルの中間の性質を持つ		
パステルペンシル	鉛筆状のパステル		
オイルパステル	油性の粘着剤を含む	油絵に似たべったりとしたストローク	

表1 パステルの種類

分は粉末状の顔料と、それを固形化するための粘着剤である。顔料を画紙に定着させる接着剤の役割を果たす成分はほとんど含まず、粘着剤の量も多くはない。パステルの種類はそれに含まれる粘着剤の質と量、顔料そのものの硬さ、スティック状に形作る過程でかけられる圧力の度合いなどにより分類される〔表1〕。

一般に言う「パステル」とはその中で最も粘着剤の量の少ないソフトパステルを指すことが多い。

2.2 パステル画の特徴

2.2.1 支持体

パステル画において、描画を行う場である支持体は主に紙である。紙面のテクスチャを利用した表現がパステル画の特徴の一つであるため、凹凸がはっきりし顔料の引っ掛かりのよいもの、横の摩擦（ぼかし、こすりこみ）に強いものが適している。

パステルで線を引くと、支持体表面の凸部分に顔料が置かれる。すなわち、支持体の凹凸の状態はパステル画全体の雰囲気大きく影響する。ただし、ストロークをぼかす、パステルを砕いて粉末状にして広げるといった描画作業の中で肌理の凹部分にも顔料が詰まり、筆圧により凸部分をつぶしてしまうので、重ね塗りやぼかしの繰り返すうちに肌理の効果は徐々に薄れていく。

2.2.2 描画技法

パステル画の基本描画技法は、ドローイングとぼかし（ブレンダー）である。ドローイングはパステル画における全ての表現技法の基となっているため、単純なドローイングが表現できればその他の技法への応用が可能である。また、ぼかし（ブレンダー）は支持体の上に載せられた顔料をこすり、ストロークの境界や肌理の現れ方、発色などに変化を与える技法であり、パステル画の雰囲気を作る重要な技法となっている。

3. アルゴリズム

以上のようなパステルの性質を考慮し、次のようなモデリング方法を試行する。

3.1 モデリング

最初に三次元空間に描画対象となる3Dオブジェクトを配置する。オブジェクトを構成する面は全て四角ポリゴンである。オブジェクトの見え方がユーザーの望む形になるよう、回転・移動・拡大／縮小といった各種変換を行い、視野を定める。次に通常のレンダリング手順に従って透視変換、隠線消去・隠面消去を行い、続いて輪郭線・特徴線の抽出〔13〕を行うことで、描くべきポリゴンや線、点などを求める。

面の表現は、ストロークによって四角ポリゴンを

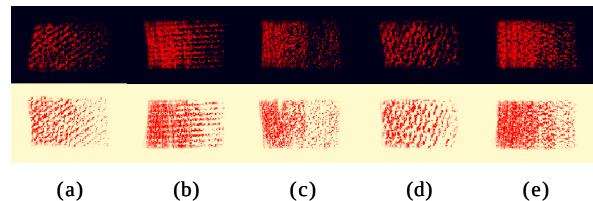
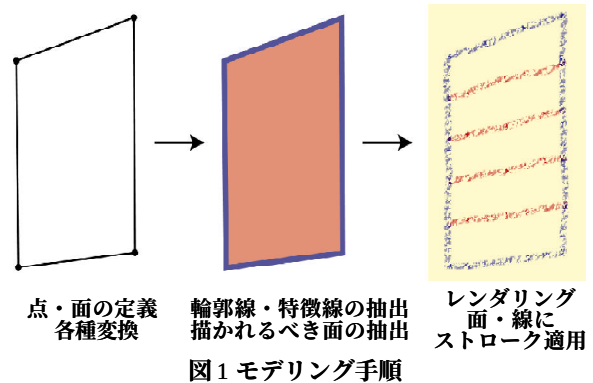


図2 支持体の影響例

(a) キャンソソ紙 (b) コットン紙 (c) ラシャ紙
(d) マーメイド紙 (e) 画用紙 のデータを使用。上下の画像で背景色も変化させている。

「塗りつぶす」ハッチング技法を用いている。ポリゴンの4つの辺のうち、対面する一対の辺の長さをそれぞれストローク密度 sd で分割し、分割した辺上の点をそれぞれ面を塗りつぶすストロークの「始点」および「終点」としてストロークを描く。ストロークの色はその面をフラットシェーディング計算した結果の色を適用する。これは、実際のパステルでの描画では1ストローク上で色が連続的に変化することが無いということに従っている。

現段階では、ハッチングを単純に各ポリゴンの水平方向あるいは垂直方向に対して平行に入れている。多くの場合、この方法で簡易的にデッサンを行ったような効果を得ることができる。ポリゴンが密集しているモデルの場合、ストロークも過密状態となるため、意図的にストローク密度 sd を下げるなどの処理が必要となる。ハッチングの水平／垂直の切り替えはユーザーの操作にゆだねる。

最後に、パステル画の質感を得るため、二次元平面を想定してストローク及びストロークに付随するパステル粒子を生成する〔図1〕。

3.2 支持体の考慮

パステル画の主な支持体である紙のテクスチャは、パステル画の味を決定する重要な要素のひとつである。そのため、支持体の凹凸を濃淡に変換し、画像全体に反映させるだけでも、ある程度パステル画らしい効果を得ることができる。まず、実際の紙面に照明を当てて撮影し、紙面の凹凸を白黒の濃淡画像として得る。この際、紙面のテクスチャがはっきりするように

光源の位置や撮影方法を調整する。獲得したテクスチャを白-黒の濃淡値になるよう修正を加え、実際に使用する紙面のテクスチャとする。照明の効果により、濃度の高い部分は紙面の凹部、低い部分は凸部とみなすことができる。そのため、濃度差を高くすれば凹凸の深い、低くすれば浅い「紙面」を定義することになる。この濃淡値から顔料の付着率の分布データを作る。すなわち濃度の高い部分には顔料の付着率を高く、低い部分には高く設定する。紙面の任意の位置の顔料の付着率を $V(x,y)$ と表すと、 $0 \leq V(x,y) \leq 255$ である。

3.3 付着率と顔料

パステルに加わる筆圧が変化すれば、顔料の紙への付着率も変化する。圧力が高ければ紙の目地を押しつぶすので、紙のテクスチャによる付着率を無視したべったりとしたストロークになる。逆に低ければ顔料は紙の凸部分の比較的狭い範囲のみに付着し、紙のテクスチャが強調される。これは、粒子状の顔料を扱う画材に共通して見られる現象であり、Sousa らの鉛筆画の研究 [10] [11] でも、黒鉛がその性質と筆圧、鉛筆接紙面とにしたがって紙面に蓄積されるモデルを生成している。Sousa らは、鉛筆接紙面の形状をポリゴンで表現し、筆圧が集中するポイントと周辺の圧力から黒鉛の付着程度を計算している。しかし、パステルの場合、鉛筆とは違って接紙面が広く柔らかく、鉛筆のようなはっきりと筆圧が集中するポイントはないか、あるいはパステル接紙面の顔料の状況によって出現・消滅する。そのため、ここでは単純化して、筆圧と紙面の持つ顔料の付着率のみを考慮している。また、紙面はその色によってもパステル画の雰囲気大きく影響を及ぼす。紙面に色を設定した場合、紙面と顔料との混色が必要となるので、付着した顔料はその数に応じて不透明度として与える。付着した顔料を指などでこすってぼかす場合でも、紙の凹部分には顔料が入りにくいため、同様の操作で「筆圧 (press)」をストローク付着の際よりも高く設定すれば、パステル画らしい効果を得ることができる [図2]。

3.4 ストローク

絵画を特徴付ける構成要素として重要なものに、ストロークの存在がある。例えば Northrup [12] でも、筆のストロークを定義し、さまざまなパラメータによって変化を加えることで、筆という画材の個性を演出している。ストロークの状態は画材によって違うため、固形の顔料であるパステルにも固有のストロークを生成しなければならない。

パステル画は基本的にストロークによって構成され

る。ストロークはある程度の幅を持ったパステルの軌跡である。その描画技法はさまざまであり、それぞれ独特の効果を持つ。また、パステルの形状によってもストロークの基本的な形状に影響が出る。本研究でははっきりとしたストロークを描くのに最適な、四角いハードパステルによるストロークを想定している。これは全てのストローク技法の基本となるものである。

手描きのストロークには必ず手ぶれが付随する。加えて、ぶれは紙面のむらによっても生じる。このような揺らぎを意図的に付加することで人の手で描いたように見せることが出来る。よって、本論文においてもストロークにはランダムにぶれを与える。以下にストロークの作成法を示す。

3.4.1 基本直線

まずストロークの骨子となる基本直線を定義する。始点 vs と終点 ve の間を一定の長さ dl で分割し、各分割位置に点を設置する。この点の並びを「基本直線」とする。設置された点の位置をランダムに $(\Delta x, \Delta y)$ だけ移動させ、全体としてぶれを与える [図3] (a) (b)。ぶれの範囲は適当な微小量とし、 $blur$ (単位: pixel) で表すと、 $-blur < \Delta x < blur$ 、 $-blur < \Delta y < blur$ となる。 dl は、「その紙面上の最小のストローク長」であり、 $0 \sim$ 最大値 sl までを自由に設定できる。このとき sl は、紙面の斜め方向の長さである。 dl を短くすると、モデルの形に忠実で正確な画像が生成でき、長くすると勢いのあるストロークで描かれた画像となる。 dl の長さが $vs-ve$ 間よりも長くなった場合には、基本直線では始点のみが定義されることになる。

3.4.2 補間ストローク

基本直線で定義された分割位置から、その次の分割位置までを補間するため、補間ストロークを生成する。補間ストロークのパラメータは始点・ストロークの向かう方向・ストロークの長さである。

ストロークの長さには dl を用いる。そのため、ストローク間にわずかな間隔が空くことになるが、 $blur$ の値が微小値であるため実用上問題はない。

補間ストロークの向かう方向は、ベクトルによって定める。このベクトルをストロークベクトルと呼ぶことにする。ストロークベクトルは、基本直線で設置された

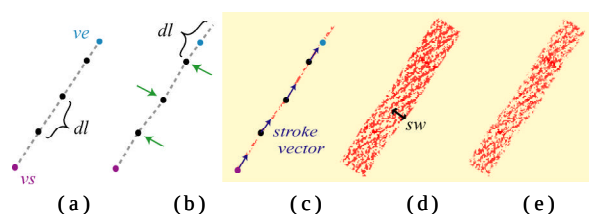


図3 ストローク生成過程

(a) 基本直線 (b) ぶれを与えた基本直線 (c) 補間ストロークによる補間後 (d) 幅を生成 (e) 幅自体のぶれを適用

隣り合う二つの点のうち、始点に近いほうから終点に近いほうへと向かうベクトルである。始点からストロークベクトルの指す方向へ一定の刻み幅で進み、進んだ各場所に顔料を置く。ここでパステル粉末の大きさ、つまり紙面上に一度に置かれる顔料の量を粘着率 s と定義する。 s は顔料の粒子どうしの粘着性に相当し、付着した部分のピクセルの透明度を決定する。 s は 1 以上の任意の数である。

補間ストロークが描かれると、顔料はまず紙面バッファ上に溜められる。全ての補間ストロークを描き終われば、バッファ上の顔料を紙面に付着させる。この際、紙面上に 255 個以上の顔料が付着しないよう、顔料の個数が超過している場合には払い落としをかける。ここで、筆圧を適当な実数値 $press$ として、次式を満たすとき、顔料が付着する。

$$V(x,y) / 255 > rand * press + (1.0 - press)$$

パステル断面の顔料粒子が不規則に移動し、ストロークの濃淡がランダムに変化する効果を擬似的に表現するため、筆圧にはランダム要素 $rand(0 < rand < 1)$ を入れている。補間ストロークの長さが「紙面上のストロークで最小の長さ」に達すれば処理を終了する〔図3〕(c)。

3.4.3 ストロークの幅

基本直線に幅を加えることで、パステルのストロークの生成は完了する。補間ストローク上の点をそれぞれ始点として、ストロークベクトルに直交するベクトルを補間ストロークの両側に対して求める。求めたベクトルの方向へ、補間ストロークの生成時と同様に紙面バッファ上に顔料を置きながら一定の刻み幅で進む。幅が初期パラメータ値 sw の半分の値に達すれば処理を終了する。この際、ストローク自体の輪郭に柔かさを与えるため、幅の既定値にランダムに揺らぎを与える。この方法で幅を求めると、ストロークベクトルに直交する形で縞ができるが、元のストロークベクトルにランダムな値の回転を加え、方向に狂いを生じさせることで、縞を軽減している〔図3〕(d)(e)。

3.4.4 ストロークの交差

異なる色のストロークが交差した場合は、交差した部分の顔料の色を同土を透明度混色する。透明度による混色は、実際のパステル顔料の混色をシミュレートするものではないが、ごく一般的な減法混色法として自然な画像を得ることができている上、本研究においてぼかしなどの処理を行ってもパステル画らしさを損なうことはないので擬似的に用いている。透明度混色は以下の式を用いる。

$$a = ta / (tb + ta)$$

$$c = a * a + b * (1 - a)$$

ここで、 a 及び b は混色する色、 c は混色の結果の色、 ta, tb は混色する色の透明度である。

より正確な混色のシミュレーションが必要な場合には、Curtis [5] らの光学的混色法の適用などが考えられる。このとき、実際のパステル画では、後から描かれたほうの色がやや優勢になる。これは、紙面に直接顔料を付着させる場合と、既に紙面に付着した顔料の上に更に顔料を付着させる場合とで、顔料の付着率が異なることによって起こる。この現象を表現するため、後から描かれた色のほうが優勢になるよう、透明度にやや偏りをつける。上記式の場合、 $ta = ta + trand$ として計算を行う。このとき $trand$ は 0 - 1 までのランダムな値である。混色は紙面バッファ上で行う。交差したストロークの例は、〔図4〕に示している。

3.5 ストローク描画技法

3.5.1 ブレンド技法

パステルでは、やわらかでぼんやりとした質感を出すため、紙面に付着した顔料の粒子を指や筆などを用いて更に細かく砕いて周囲にひろげることができる。以降この作業を「ぼかし」と定義する。ぼかしは、紙面上での混色（ブレンド）の主な方法として用いられる。ストロークにより付着した顔料の位置をぼかしの中心とし、周囲に顔料を広げる。顔料の広がり方にはガウス分布を用い、平均は0、分散はぼかしの範囲と関連付けるため、ぼかしの範囲と等しくする。ぼかしの範囲は、紙面上のパステルをぼかすのに物理的に無理のない程度の範囲を想定し、大体半径 40 ピクセルまでとした。また、ぼかし後の顔料も、紙面の凹部分には入り込みにくいため、紙面の任意の位置の顔料の付着率 $V(x,y)$ に従って付着させる。二色以上が紙面にある状態でのぼかしでは、それらの色がぼかし処理によって重なれば混色を行うことになる。混色にはストロークの交差 (3.4.4) と同様に、ぼかし処理後の透明度を用いて、透明度混色を行う。〔図4〕に生成したストロークに対してぼかしを実行した結果を示す。

3.5.2 一般的なストローク

パステルでストロークを描く場合、最も一般的な描画方法は、パステルの比較的尖っている部分を用い、描き始めに力を入れ、徐々に力を抜いて描き終わりはさっと流すというものである。こういった筆圧の変化はほとんど無意識で行われる。最初から最後まで一定の濃さを持ったストロークは、意識して筆圧を均等に与えなければ描くことはできない。

筆圧の強弱は紙面の付着率の高低なので、基本直線を描く際に始点から終点にむけて付着率を徐々に減衰させれば実現できる。〔図5〕に実行例を示す。

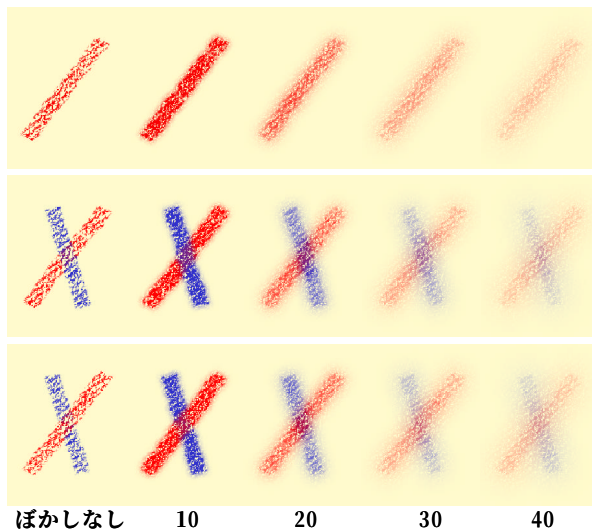


図4 ぼかし (ブレンド技法)
上から順に、単色のぼかし、赤のストロークに青のストロークを重ねたもののぼかし、青のストロークに赤のストロークを重ねたもののぼかし。表下の数字は、ぼかしの半径 (単位: ピクセル)。

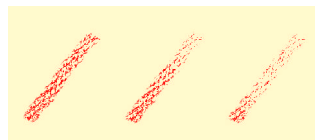


図5 一般的なストロークの例

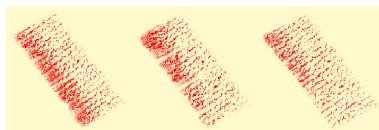


図6 サイドストローク技法の例

3.5.3 サイドストローク技法

パステルの側面を使って幅のあるストロークを描くサイドストローク技法の場合、均等に力を入れる場合と、エッジのどちらかに力を入れて立体感のあるストロークを描く場合とがある。前者は単純にストロークの幅を広く取ればよいが、後者の場合には付着率による変化をつけることが必要である。本論では、基本直線の両側に対して幅を付けているので、ストロークの中心からエッジ方向にむけて、片方は徐々に付着率を高く、もう片方は徐々に低く設定すれば、片側に圧力のかかったストロークを得ることができる。このとき、一般的なストロークの場合と同様、始点から終点にむけて付着率を徐々に変化させることも可能である。〔図6〕に実行例を示す。

4. 実験

前述の方法により、モデルデータに対してパステル画風画像のレンダリング実験を行う。実験には、標準的なPC (Pentium III 500MHz / WindowsNT 4.0 / VisualC++ 6.0) を利用している。

まず、ボックスモデルに対してストローク及びストローク技法を適用した効果を〔図7〕に示す。(a)は技法を加えないストローク、(b)は徐々に筆圧が弱まる「通常の」ストローク技法、(c)はサイドストローク技法を使用し、それぞれストローク幅などを調節して適用した。その他照明やストロークのぶれ、輪郭線・特徴線の幅といったパラメータは等しく設定してある。この例を見ると、ストローク技法によってパステルにかかる筆圧の変化を表現することで、手描き感が強まっていることがわかる。また、ストロークの状況のみで異なる雰囲気画像を作りだすことにも成功している。計算時間は、多少変動はあるが概ね30秒程度である。それぞれの下の画像は、ストロークの無い部分に $V(x,y)$ の値に応じて薄く黒色をつけたものである。この操作は、紙テクスチャの「影」をわずかに可視化することで紙面を強調するものであり、絵画の雰囲気を表現するのにも効果的である。

〔図8〕では、パステル画の柔らかな質感を出す、ぼかし技法の影響を示す。(a)の画像に対して、本技法によるぼかし技法を適用したものが(b)である。また、(c)は比較のために、(a)に対して市販のフォトタッチソフトを用いたガウシアンフィルタによるぼかしを適用したものである。(c)のような画面全体に対するフィルタリングによるぼかしとは異なり、本技法によるぼかしである(b)の例では、顔料の量によりぼける範囲は不均一である。そのため、筆圧により紙面に埋め込まれた顔料がぼかし操作後もストロークの形で残る、パステル画特有のぼかしの効果が認められる。ぼかしにかかる時間は、顔料の量により異なる。〔図8〕の場合は、(a)の画像で30秒、(b)の画像では43秒を要した。

〔図9〕は、ストローク生成やモデルデータに関するパラメータを等しくして、支持体に関してのみ異なるデータを与え、支持体の影響による画面の雰囲気の変化を示したものである。(a)はキャンソン紙、(b)はラシャ紙、(c)はコットン紙より得たデータを使用している。それぞれの紙表面特有の凹凸パターンがストロークや画面全体に及ぼす影響が見られ、支持体の差による画面効果が確認できる。

5. 応用例

〔図10〕および〔図11〕は、顔料の付着率・顔料の粘着性・ストロークの幅・紙面のデータ・モデルデータといった、本技法におけるさまざまなパラメータを変化させることによって得ることのできる画像である。

〔図10〕は複数の立体を用いたものである。ごく一般的なパステル画を想定し、紙面には薄いグリーンのマーメイド紙を用い、オブジェクトの面はサイドストロー

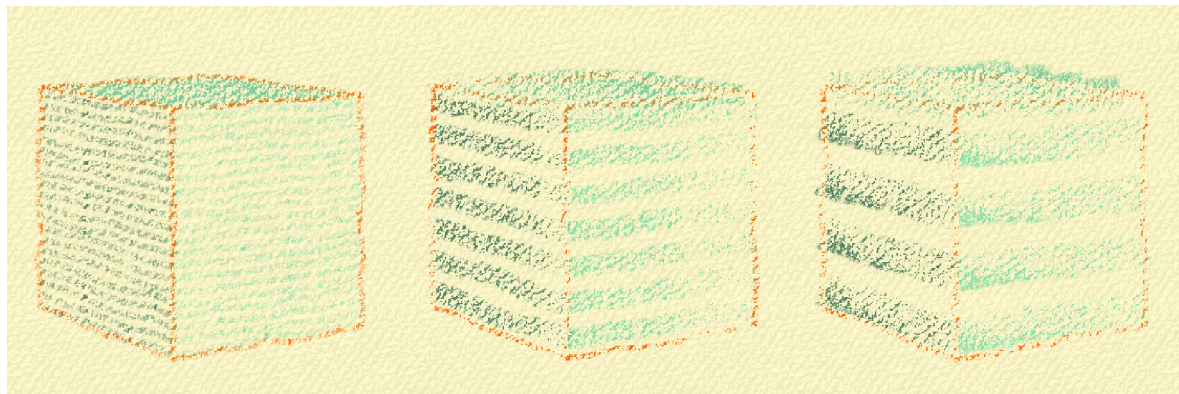
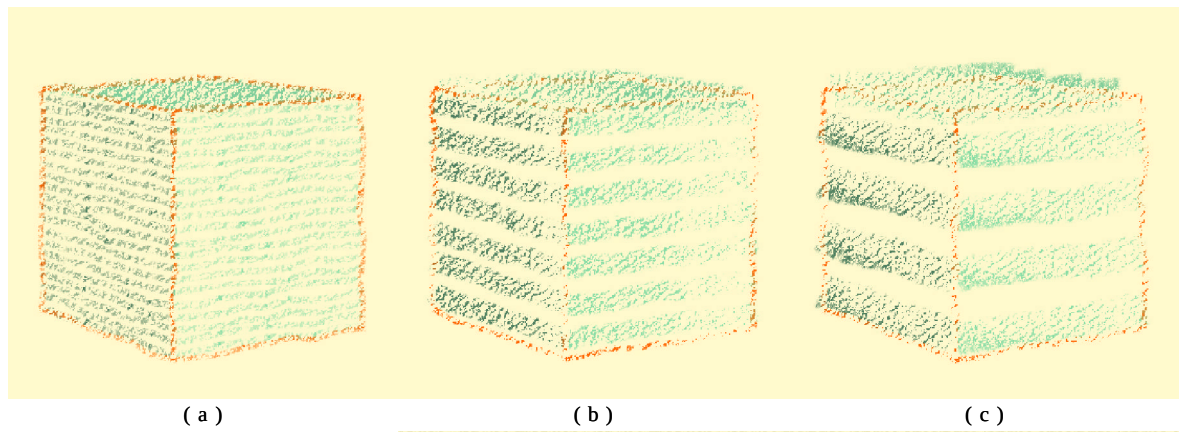
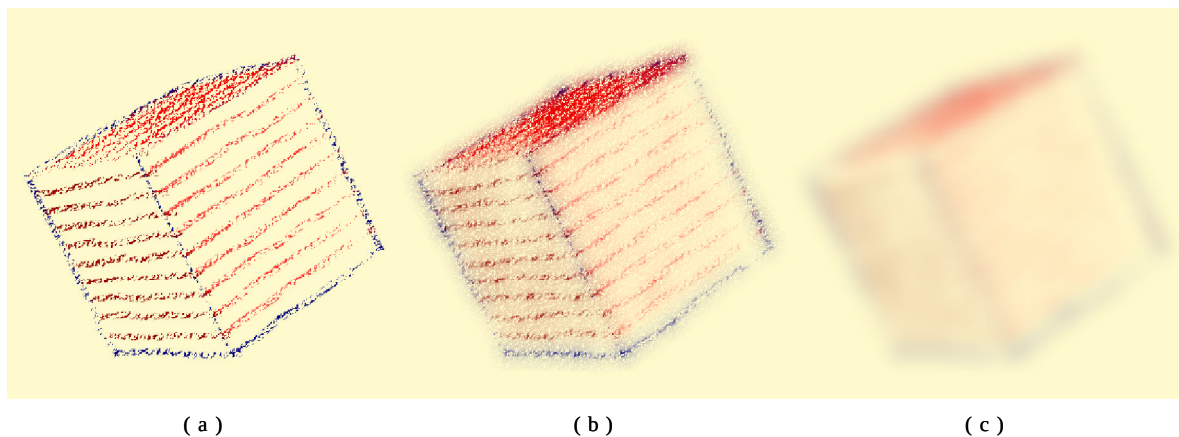


図7 ボックスモデルへの適用例

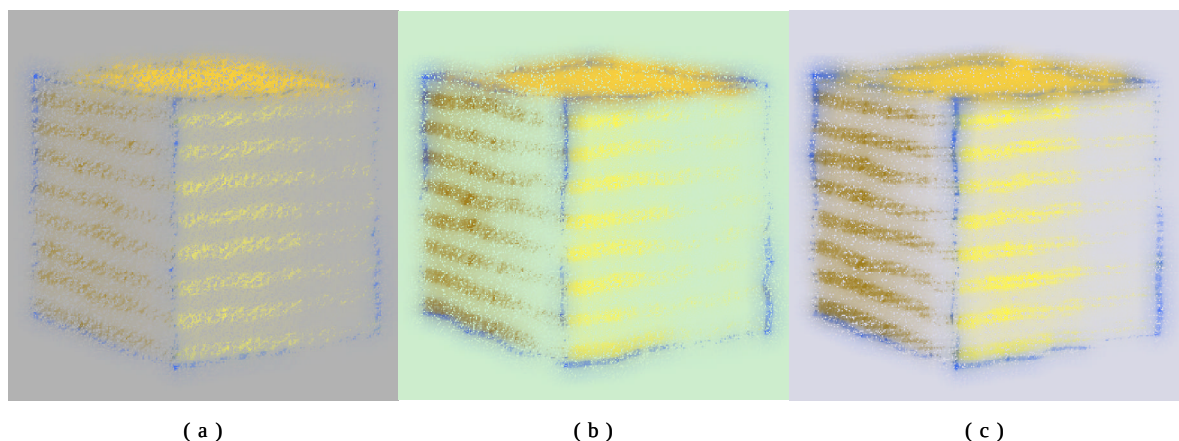
共通パラメータ<特徴線の $sw=8.0$, 輪郭線の $sw=5.0$, $dt=1s/30$, $blur=3.0$ $press=0.7$ >
 (a) 技法なしのストローク<面の $sw=8.0$, $sd=20$ > (b) 通常ストローク<面の $sw=30.0$, $sd=7$ >
 (c) サイドストローク技法<面の $sw=100.0$, $sd=4$ >
 キャンソーン紙を使用、下図では背景にも紙面のテクスチャを適用



(a) (b) (c)

図8 ぼかしの比較

(a) 元画像 (b) 本技法でのぼかし (c) ガウシアンフィルタによるぼかし



(a) (b) (c)

図9 支持体の影響例

(a) キャンソーン紙 (b) ラシャ紙 (c) コットン紙