

## パステルの質感を持つストロークのレンダリング技法に関する研究

村上, 恭子

---

<https://doi.org/10.15017/458912>

---

出版情報 : Kyushu University, 2004, 博士（芸術工学）, 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :

---

## 第2章

パステルの質感を持ったストロークの表現

---

本章では、パステル画を構成する基本要素であるストロークを、観察モデルから生成する手法を提案する。特にパステルの主な構成要素である顔料と紙面との関係に焦点を当てることで、パステルストローク独自の質感の再現を目指す。

## 2.1 画紙モデルの生成

1. 2. 1 で述べたように、実際のパステルのストロークは画紙の凹凸によってパステルから顔料が削り取られ、紙面上に付着することによって作られる。そのため、画紙の凹凸はストロークの形状を決定する重要な要素の一つである。

画紙のモデルである凹凸データは、実際の紙をデジタルデータへと変換して取得する。紙面を直接スキャナで取り込む方法は、肉眼で容易に観察できる大きな凹凸を持った紙面に対してはある程度有効であるが、細かな凹凸を持った紙面では不可能である。そのため、実際の紙面に照明を当てて撮影することで、紙面のテクスチャを得る。この際、紙面のテクスチャを容易に観察できるように、光源の位置や撮影方法を調整する。取得したテクスチャを黒一白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である Height Field [CAS\*97] を作る。すなわち濃度の高い部分には顔料の付着する確率を低く、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  $H(x,y)$  と表すと、以下のように表記できる。

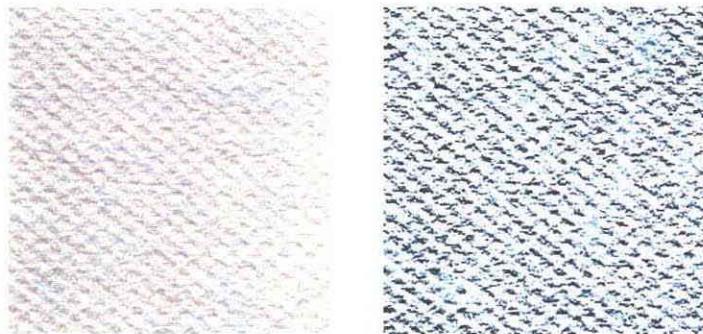
$$H(x,y)[0-255]$$

## 2.2 ストロークモデルの生成

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り、ストロークパスを基準としたパステル顔料粒子の集合体である。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。ハードパステルは顔料粒子をまとめる粘着材をある程度含んでいるため、ストロークの形状ははっきりしており、パステル自体の形状の影響も受ける。しかし顔料粒子のまとまりは簡単に碎けるため、パステル画の質感を決定する粉粒状画材としての特徴は失わない。そのため、ハードパステルによるストロークは、他の種類のパステルによるストロークの基本ともなる。

手書きのストロークには必ず手ぶれが付随する。よって、ストロークパスにノイズ関数による揺らぎを生じさせることで手ぶれの表現を行い、人の手で描いたように見せることができる。また、パステルのような柔らかな画材においては、紙面のむらや画材の断面形状の変化によってもぶれが生じる。よって、本技法では要所にノイズによるぶれを与える。

以下にストロークの作成法を示す。



紙面（キャンソン紙）の写真。左の写真より得た Height Field.

図 2-1. Height Field の作成。

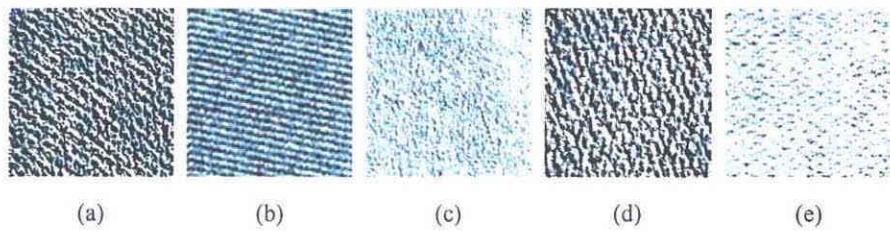


図 2-2. 数種類の紙面から得た Height Field の例。

(a) キャンソン紙, (b) コットン紙, (c) ラシャ紙, (d) マーメイド紙, (e) 画用紙。

### 2.2.1 基本直線

まずストロークパスとして基本直線を定義する。基本直線のパラメータは始点と終点である。始点  $S_s$  と終点  $S_e$  間の長さを、一定の長さ  $minlength$  に最も近い値で割り切れるように  $n$  分割し、各分割位置に点を設置する。この  $n+1$  個の点の並びを基本直線とする。 $minlength$  は、「現在の紙面上での最小のストローク長」であり、 $0 \sim$ 最大値  $maxlength$  までを自由に設定できる。このとき  $maxlength$  は、紙面の斜め方向の長さとする。 $minlength$  を短く設定すると、モデルの形に忠実で正確な画像が生成でき、長く設定すると勢いのあるストロークで描かれた画像となる。 $minlength$  の長さが  $S_s-S_e$  間よりも長くなった場合には、基本直線は定義されず、従ってストロークは描かれない。

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。ぶれの範囲は適当な微小量とする。本研究では以下のように設定している。

$blur$  ( 単位 pixel ) [0.0–10.0]

$$-blur < \Delta x < blur$$

$$blur < \Delta y < blur$$

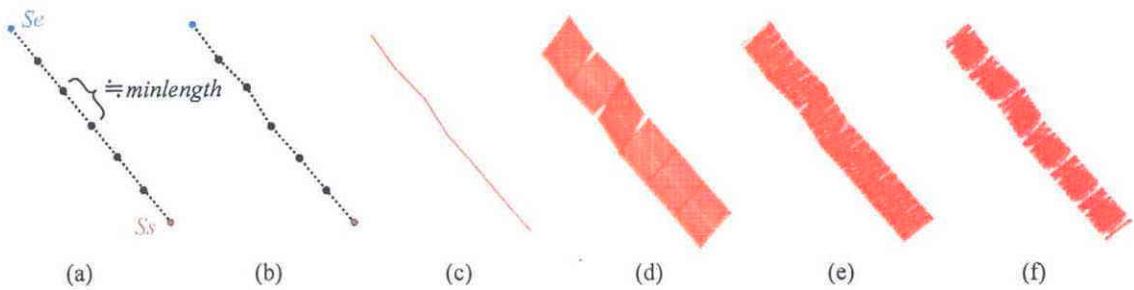


図 2-3. ストロークモデルの生成。

(a) 基本直線の設定, (b) 基本直線にぶれを追加, (c) 補間ストローク生成, (d) 幅を生成, (e) 幅を作る直線にぶれを追加, (f) 幅自体にぶれを追加.

### 2.2.2 補間ストローク

基本直線を定義した後、この点列の間を補間するための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。

補間ストロークの始点は、基本直線の終点を除く  $n$  個の各点である。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  $Vs$  と呼ぶこととする。また、ストロークの長さには  $minlength$  を用いる。

$Vs$  は、基本直線で設置された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幅  $\Delta d$  で進み、進んだ各場所に顔料を置く。顔料は、紙面と同じ大きさを持つストロークバッファ上に保存される。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個数  $pigments$  を定義する。 $pigments$  は 1.0 以上の任意の数であり、実験では  $pigments [1.0\text{--}3.0]$  を用いている。これは顔料の粒子同士の粘着率に相当し、顔料が付着した部分のピクセルの透明度を決定する。筆圧は実数値  $pressure[0\text{--}1]$  として定義され、顔料の付着と同時にストロークバッファに保存されていく。補間ストロークの長さが  $minlength$  に達すれば処理を終了する。隣り合う補間ストロークに生じる間隔は、ぶれの範囲  $blur$  の値が微小値であるため無視できる。

### 2.2.3 幅の付加

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。幅の広さは既定値  $strokewidth$  で決定し、任意の値を取る。実験では、 $strokewidth [1.0\text{--}30.0]$  を用いている。補間ストローク上の点をそれぞれ始点として、その両側に、ストロークベクトル  $Vs$  に直交するベクトル  $Va(x,y), Vb(x,y)$  を求める。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ストロークバッファ上に顔料を置きながら、一定幅  $\Delta d$  で進む。ストロークの幅

が既定値 *strokewidth* の半分の値に達すれば処理を終了する。この際、パステル断面の変形によるぶれを生じさせるため、ストロークの両側の *V<sub>a</sub>* 及び *V<sub>b</sub>* には回転によるぶれを与える、パステル断面の細かい変化を表現する。また、*strokewidth* に乱数による揺らぎを与えることで、ストロークの輪郭をぼかす。

#### 2.2.4 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、ストロークバッファ上の同一位置に異なる色の顔料が同時に存在することになる。このような場合には透明度混色を行い、最終的な色とする。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。しかし、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おり [Pho03]、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ため擬似的に用いている。透明度混色は以下の式を用いる。

$$\begin{aligned}\alpha &= t_a / (t_b + t_a) \\ c &= a * \alpha + b * (1 - \alpha)\end{aligned}$$

ここで、*a* 及び *b* は混色する色、*c* は混色の結果の色、*t<sub>a</sub>*、*t<sub>b</sub>* 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、Kubelka-Munk モデルによる光学的混色法の適用 [CAS\*97, HW92] などが考えられる。

ストロークが交差するとき、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、透明度に偏りをつける。上記式の場合、*t<sub>a</sub>* = *t<sub>a</sub>* + *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。

#### 2.3 ストロークと画紙モデルの相互作用

以上の手法を用いてストロークを定義した後、ストロークバッファに保存された顔料を紙面に付着させ、パステルの質感を持ったストロークを生成する。この際、紙面上に必要量以上の顔料が付着しないよう、顔料の個数が個数の最大値である 255 を超過している場合には 255 に丸めておく。筆圧 *pressure* が次式を満たすとき、顔料が付着する。

$$H(x,y) / 255 > (1.0 - pressure)$$

ストローク生成時の筆圧・幅の設定によって、ストロークの形状にバリエーションを持たせることができる。これを用いて、パステル画において一般的に良く見られるストロークと、描画技法として特徴的なサイドストローク技法の表現を行う。また、顔料を紙面に付着させた後、更に顔料の位置を操作することで、ぼかし技法の表現を行う。

### 2.3.1 一般的なストローク

パステルでストロークを描く場合、描き始めから描き終わりまで均一の濃さを持ったようなものは、人間が意識して筆圧を均等に与えるようにしなければ、描くことは不可能である。一般的には、描き始めには力を入れ、徐々に力を抜きながらパスを描き、描き終わりの時点ではほとんど力を入れずに終点まで描く。こういった筆圧の変化はほとんど無意識に行われており、通常のパステル画の画面においてよく見られるため、これを一般的なストロークとして実装する。基本直線の設定と同時に、各セグメントに筆圧を与え、これを始点から終点にむけて徐々に減衰させることで実現する。図2-4に実行例を示す。

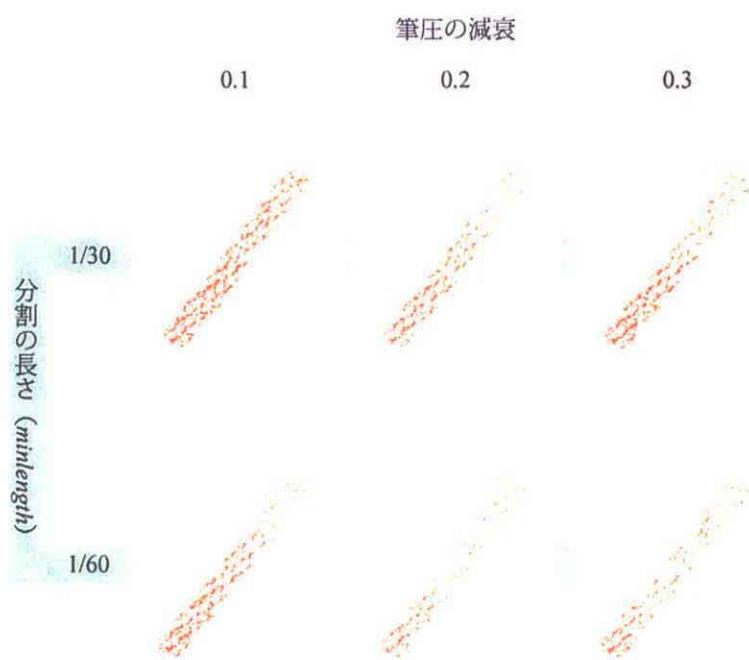


図2-4. 一般的なストロークの例。

### 2.3.2 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、パステルのどちらかの端に力を入れて立体感のあるストロークを描く場合がある。前者は単純にストロークの幅を広く取ればよいが、後者の場合には筆圧に変化をつけることが必要である。本手法では、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、片方は徐々に筆圧を高く、もう片方は徐々に低く設定することで、片側に圧力のかかったストロークを得る。このとき、一般的

なストロークの場合と同様、始点から終点に向けて筆圧を徐々に減衰させることも可能である。図2-5に実行例を示す。

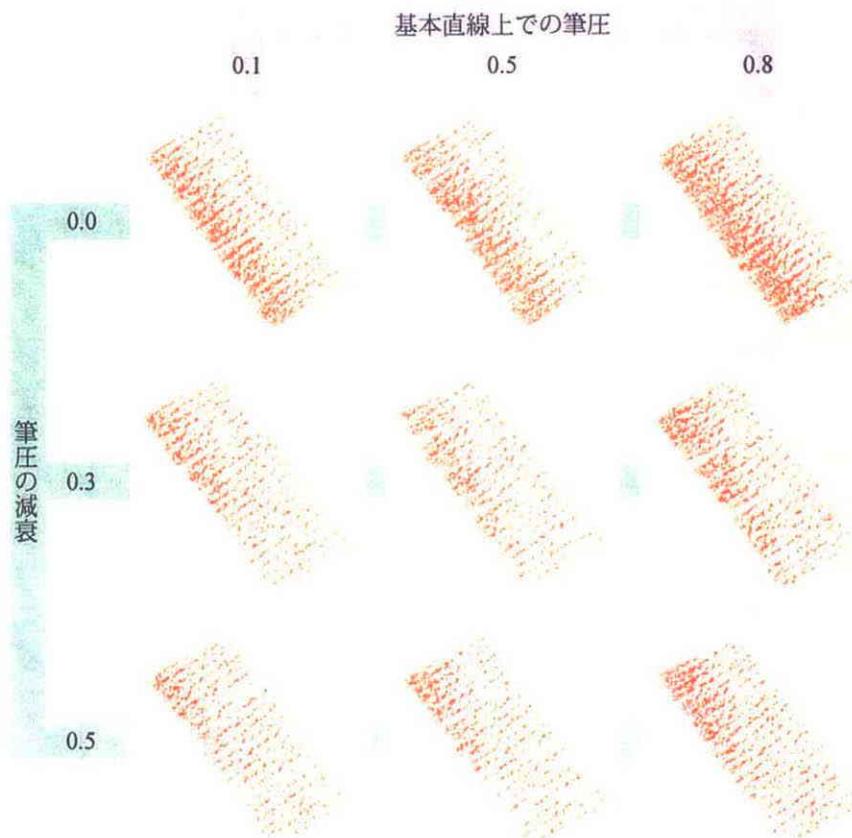


図2-5. サイドストローク技法の例.  $minlength = 1/30$ .

### 2.3.3 ぼかしの実装

画面上に置かれた顔料を指や筆などを用いて画紙上に広げる技法をぼかし技法という。ぼかしによって顔料の粒子はより細かく碎かれ、紙面の凹部分にも付着する。この技法には画紙上での混色のためのものと、質感を得るための技巧的なものとがあり、前者は紙面上で顔料を混ぜ合わせて新たな色を得るために用いられることからブレンディング、ブレンド技法とも呼ばれる。

本研究では主に後者を想定している。ストロークにより付着した顔料の位置をそれぞれぼかしの中心とし、付着している顔料をその周囲に円状に移動させる。

顔料の広がり方にはガウス分布関数を用いている。ガウス分布関数は次の式で表される、

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

顔料の各付着位置を中心とするため平均 $\mu$ を0、分散 $\sigma$ をぼかしの範囲と等しく設定する。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を想定し、大体半径40ピクセルまでとした。ぼかし後の顔料は、紙面の任意の位置の顔料の付着率 $H(x,y)$ 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(2.2.3)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2-6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。

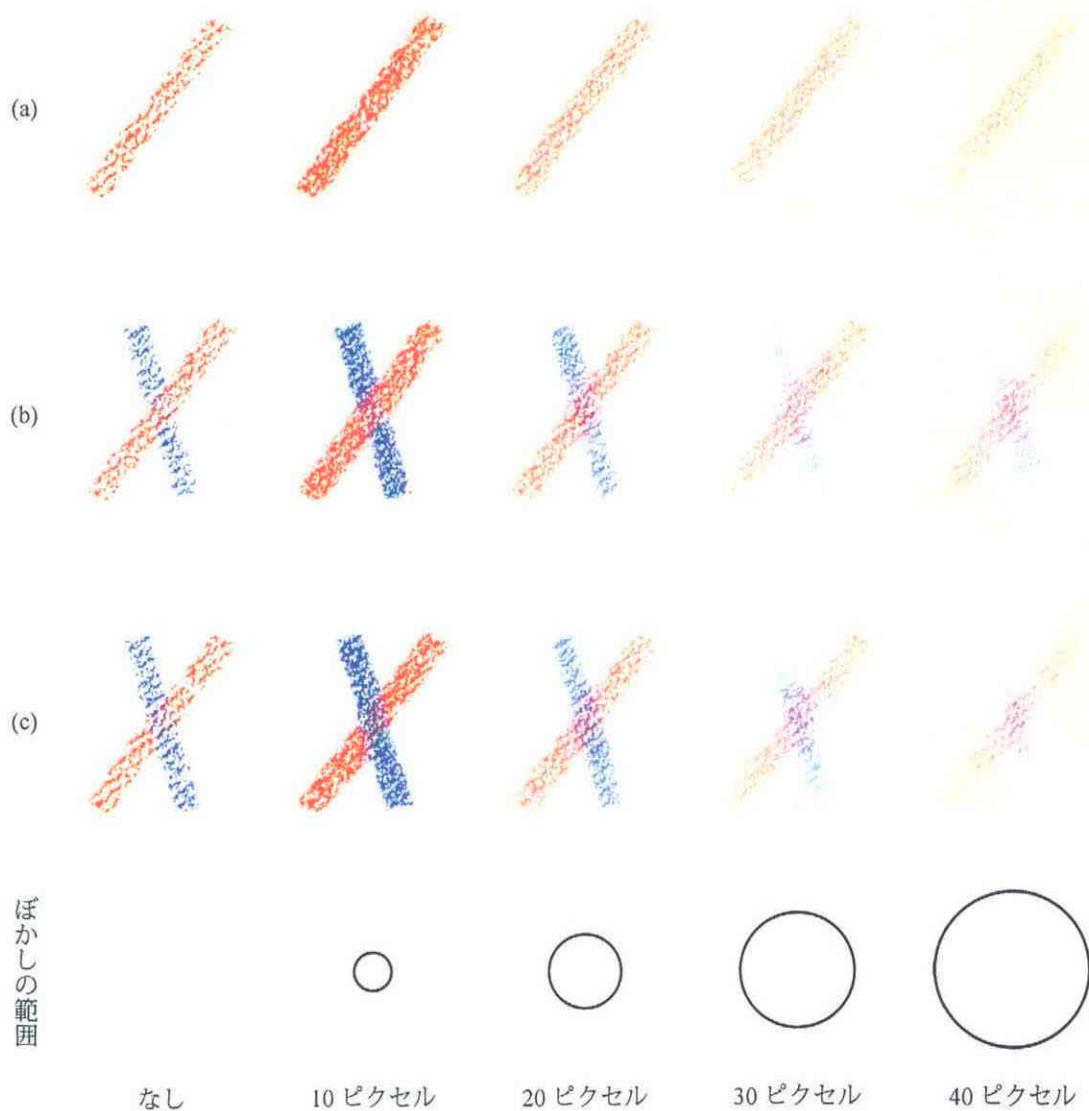


図2-6. ぼかし.

(a)～(c)は次の条件でぼかしを行ったもの。(a)単色のぼかし (b)二色のブレンド。青のストロークの上に赤のストロークを重ねて描いたもの。(c)二色のブレンド、赤のストロークの上に青のストロークを重ねて描いたもの。

## 2.4 三次元オブジェクトへの適用

以上の手法によって生成されたストロークを三次元オブジェクトの描画へと適用し、利用可能性と問題点を示す。ここでは実験のため、簡単な形状の三次元オブジェクトをパラメータを変化させたストロークによって描画する。また、紙面の影響によってストローク上に現れるテクスチャの変化を示し、ストロークの有効性と問題点を述べる。

### 2.4.1 オブジェクトの描画手法

三次元オブジェクトのレンダリングは、入力値である三次元オブジェクトから以下の手順でストローク用のパラメータを抽出し、これらのパラメータに従ってストロークを配置することで行う。

ここでは、オブジェクトの形状の把握を容易にするため、可視面の他に輪郭線及び特徴線も抽出する。輪郭線・特徴線の抽出方法は、Goochらの手法 [GG01(Chapter7)] で行う。

輪郭線：

隣接している2つのポリゴンの法線ベクトル  $N_1, N_2$  と視線ベクトルとの内積を求め、その正負が異なる場合にはそれらのポリゴンの境界線を物体の輪郭線とする。

特徴線：

隣接している2つのポリゴンの法線ベクトル同士の内積が負である場合、その2つのポリゴンの境界線を特徴線とする。

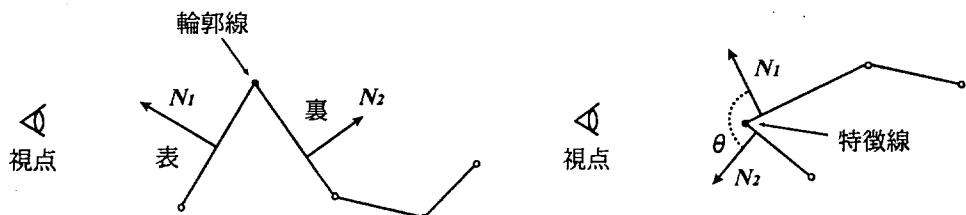


図 2-7. 輪郭線及び特徴線の定義 [CG01]。

抽出された面・線から、ストロークパスのパラメータである始点と終点（2.2.1）の配置を決定する。以下に各要素へのストローク適用手法と、ストローク色の決定方法を述べる（図 2-8）。

面：

4 辺のうち一対2辺を選択し、片方の边上に始点群、対する边上には終点群を置く。全体を平行なストロークで描くことになる。このストロークの配置は、クロス

ハッチングによる面の描き方(図1-10(c))を参考にしている。ストロークの色は面の色を用いる。照明を利用する場合は、面の法線ベクトルを利用したシェーディングを行い、最終的な面の色を決定する。

### 輪郭線及び特徴線：

境界線・特徴線を構成する辺の端点を、ストロークの始点及び終点とする。ストロークの色は面の色にはよらず、独自に与える。

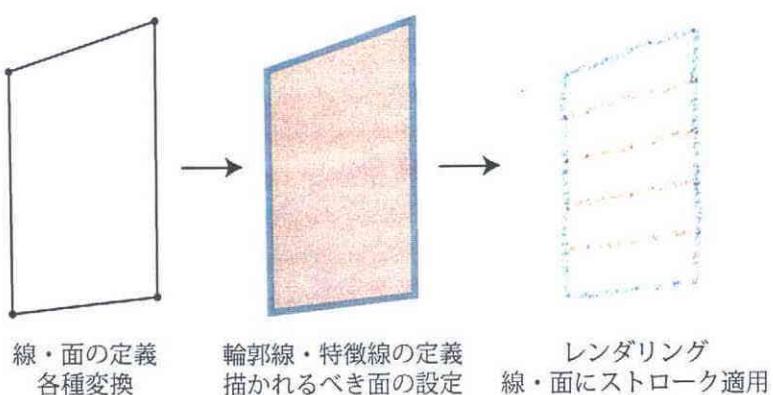


図 2-8. ストロークの配置.

2 4 2 実験

以上の手法を用いて立方体をレンダリングした例を図2-9から図2-11に示す。図2-9では、同一のモデルを異なる技法のストロークで描き、その効果を確認した。(a)では徐々に筆圧が弱まる一般的なストローク、(b)では描画技法を適用していないストローク、(c)ではサイドストローク技法によるストロークを使用し、それぞれストローク幅とストローク密度を調節して適用した。照明やストロークのぶれ、輪郭線・特徴線の幅といったその他のパラメータは等しく設定した。ストローク技法の変更のみによって、雰囲気の違う

(a)  $strokeWidth = 30$ .

(b) *strokeWidth*=5.

(c) *strokeWidth*=50.

図2-9. ボックスモデルへの適用.

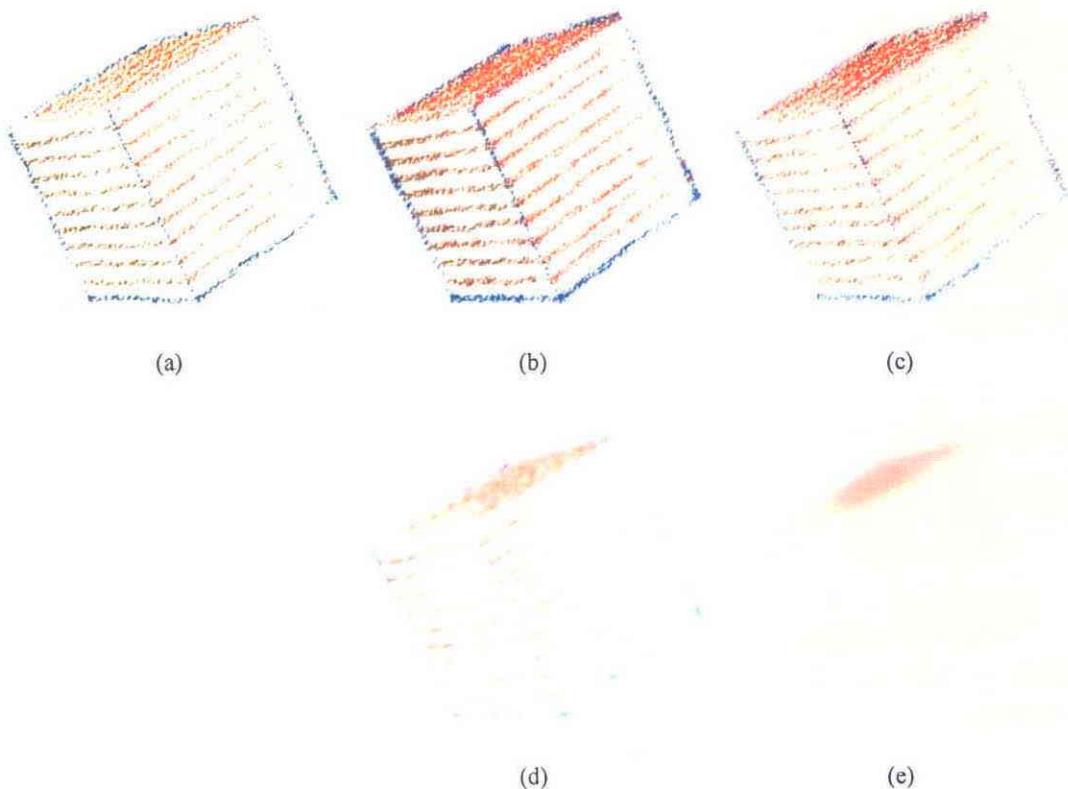


図2-10. ぼかし技法とガウスぼかしとの比較.

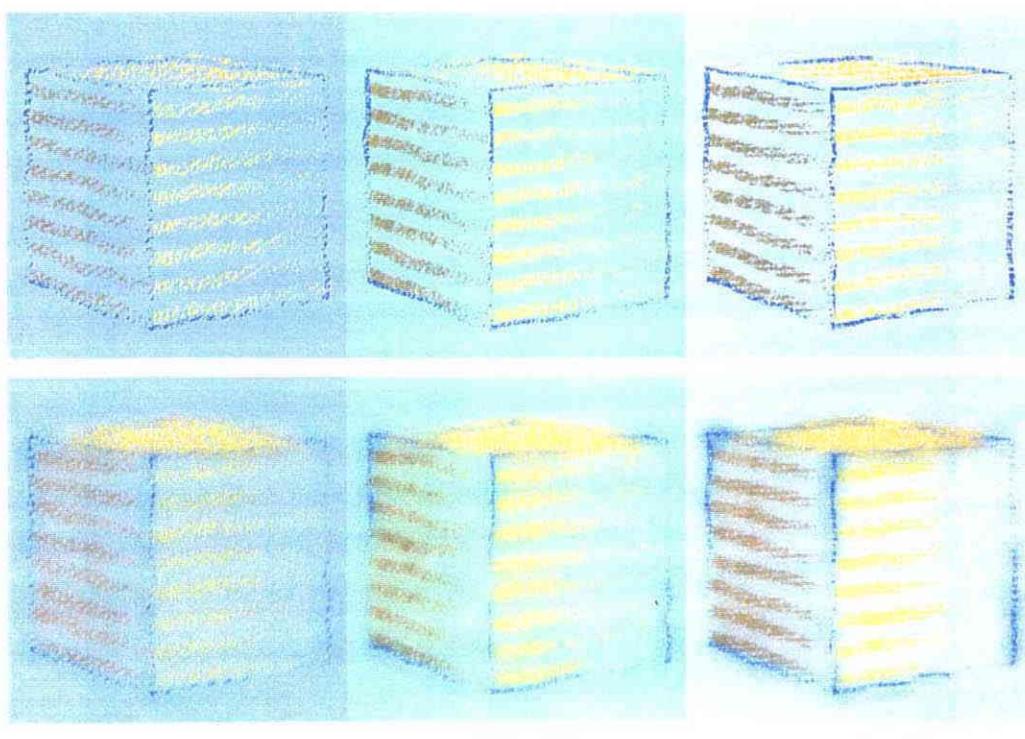


図2-11. 紙面の影響.

画像を得ることを確認できた。図2-10では、立方体のモデルをレンダリングしたものにぼかし技法を適用し、その効果を検証した。(a)の画像に対して、(b)(c)は本技法によるぼかしを、(d)(e)はフォトレタッチソフト(Photoshop [Pho03])を用いてぼかしをかけたものである。フォトレタッチソフトが画面全体に対し一様なぼかしをかけるのに対し、本技法によるぼかしではストロークによって紙面に付着した顔料がその位置に残る効果が確認できた。図2-11は紙面の影響例である。立方体を描くストロークのパラメータは等しく設定し、紙面として左から、(a)キャンソン紙、(b)ラシャ紙、(c)コットン紙を適用している。紙面の凹凸によってストローク上に現れるテクスチャが異なるため、画像の与える印象も異なるものとなった。また、下例は本技法により20ピクセルのぼかしをかけている画像である。ぼかす際にも紙面の凹凸を考慮しているため、それぞれ紙面の特徴を保ったぼかしを生成することができた。

図2-12及び図2-13は、本技法のパラメータを変更し、より複雑なモデル(りんごのオブジェクト)に適用した応用例である。図2-12ではりんごのオブジェクトを描画技法やストロークの幅、紙面、色の設定変化させて描き、ぼかしをかけている。図2-13は、パラメータの変更によってパステル以外の画材を表現した例である。(a)では顔料の粘着率と筆圧とを非常に高く設定することで、黒板にチョークで描いたような効果を得ている。(b)はストローク幅を非常に小さくして、ストロークの間隔を狭く取った例であり、色鉛筆で描いたような繊細な表現が可能である。(c)は強い色使いと筆圧の設定により、クレヨン画風の画像を得ている。

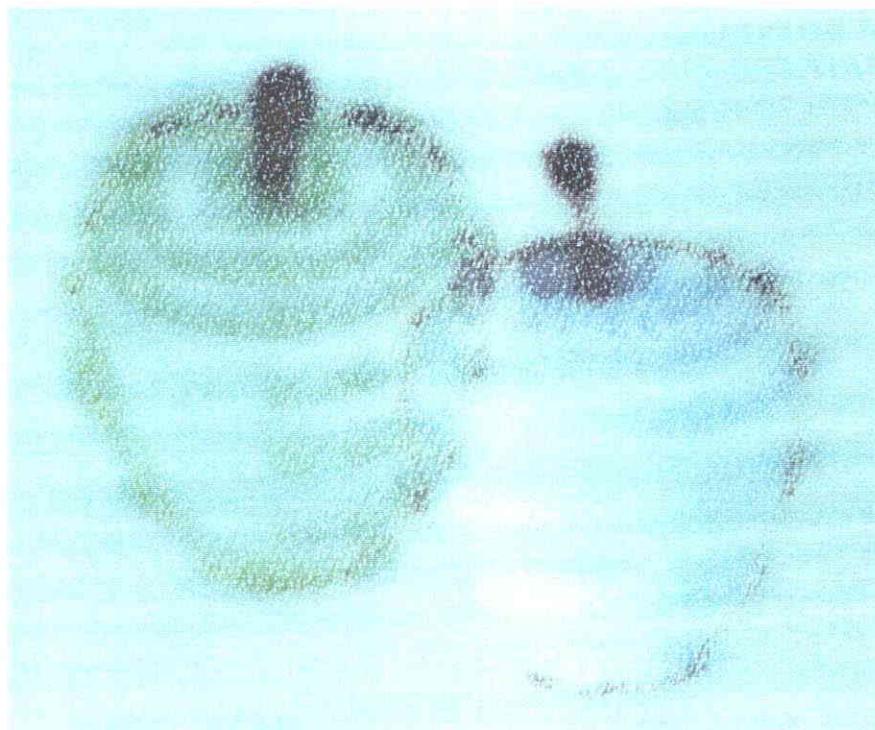


図2-12. 複雑なオブジェクト(りんご)への適用例1.  
マーメイド紙にサイドストローク技法.

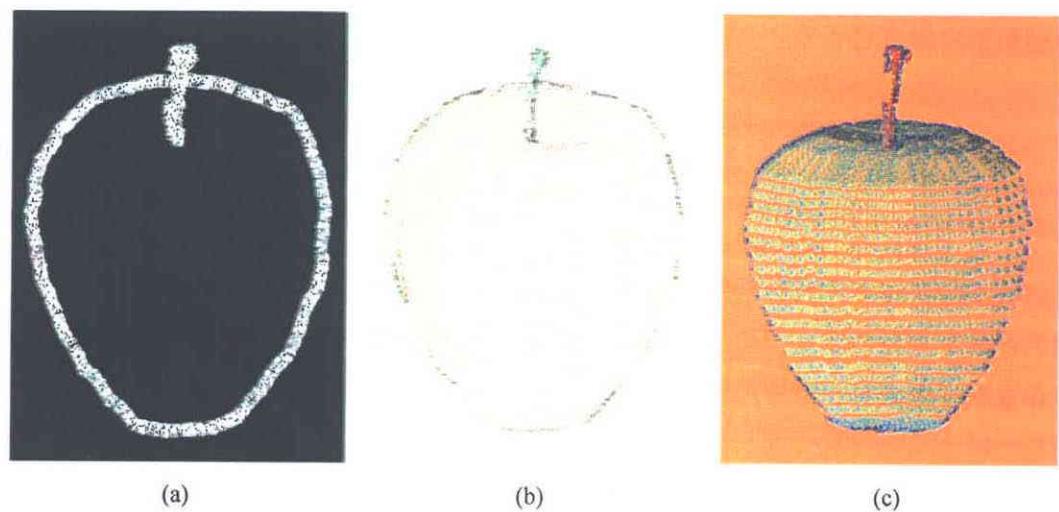
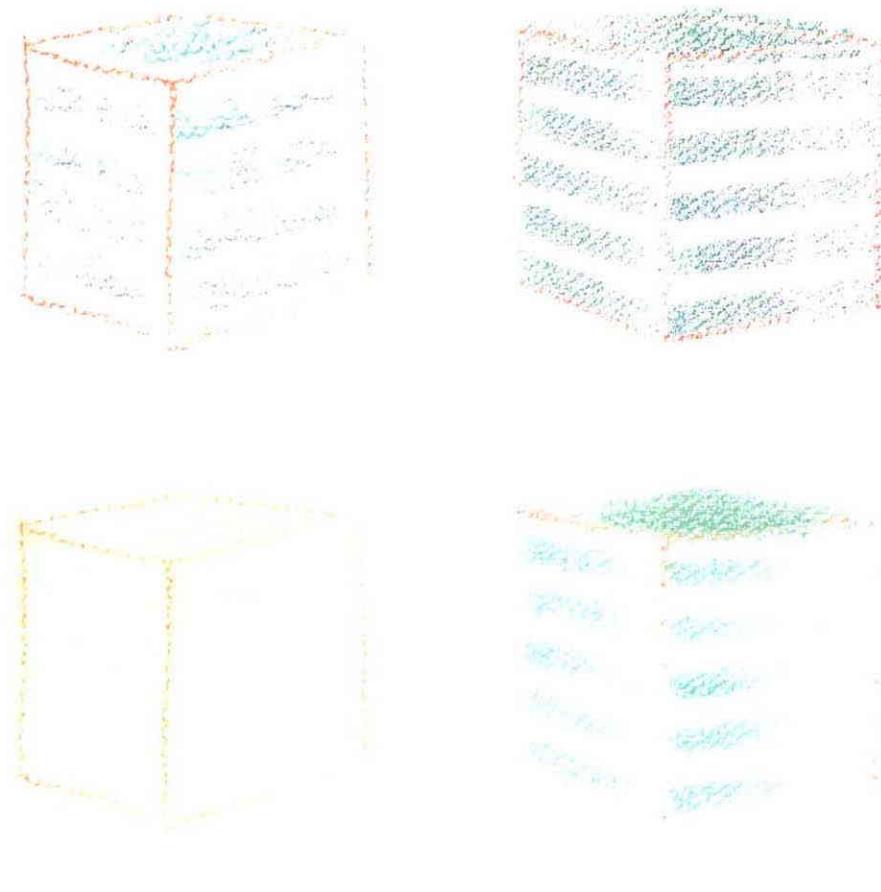


図2-13. 複雑なオブジェクト（りんご）への適用例 2.



(a) 実際のパステル画.

(b) 本技法による画像.

図2-14. 実際のパステル画との比較.

最後に、図2-14は実際のパステル画との比較である。ぼかしをかけていない状態では、本技法はかなり効果的にパステル画を再現できているが、ぼかしをかけた場合では結果に大きく差がでてしまった。

#### 2.4.3 まとめ

このような結果から、本章において生成したストロークは、パステルの質感を持っており、このストロークを用いて物体を描画することでパステル画のような質感を持った画面を構成することができたと言える。しかし、現在の手法ではストロークを適用できるオブジェクトの形状は比較的簡単なもの限られ、実用性があるとは言い難い。ストロークの配置手法も、面の向きを知ることができる点では評価できるものの、オブジェクトの自然な描画を行うには、より自由な配置が求められる。第3章においては、これらの問題点を踏まえた三次元オブジェクトへのストローク配置法を述べ、更にこのモデルを利用したアニメーションの生成について述べる。一方で、現在のストロークはパラメータを与え、手続き的に生成されるため、自動的な配置には適しているが、これを用いてリアルタイムに描画を行うことは難しい。また、本章の手法は自動生成のため、ストロークの向きという概念が存在しないが、実際のパステルのストローク上には描画する方向によって異なったテクスチャが見られる。よって第4章においてはこれらの問題を解決し、リアルタイムな描画に適したリアルなストロークを生成する手法について述べる。