

色えんぴつ画周辺技法のボリュームモデリング

高木 佐恵子[†] 藤代 一成^{††} 中嶋 正之[†]

我々は、一連の研究を通じて、色えんぴつ画に注目してきた。既存のデジタルペイントツールのさまざまな機能を組み合わせることによって、色えんぴつ画風の画像を生成することは可能である。しかしながら、色えんぴつ画にはさまざまな描画技法が存在し、その独自の魅力を表現するためには、それらの描画技法の直接的な再現が重要であると考えられる。すでに提案した色えんぴつ画のボリュームモデルでは、色えんぴつによる基本的描画を実現したが、他の用具を必要とする実際のさまざまな描画技法には対応しきれていなかった。そこで本論文では、それらの技法のうち、インプレッション、ドライウォッシュ、こする、消す、溶かす、といった代表的な技法をとりあげ、画材の相互作用を考慮したボリュームオペレータの開発を通じて視覚的に再現する。

Volume Modeling of Colored Pencil Drawing Techniques with Allied Materials

SAEKO TAKAGI,[†] ISSEI FUJISHIRO^{††} and MASAYUKI NAKAJIMA[†]

In the course of this study, we have been paying a special attention to color pencil drawing (CPD). CPD-like images can be emulated on screen by combining several functions provided by existing digital paint systems. However, faithful reproduction of drawing techniques peculiar to CPD is essential to capture the charm of CPD. This paper attempts to simulate representative CPD techniques visually by extending our previous CPD model so that it can describe in a volumetric manner, the interaction between the texture of paper and allied materials as well as the pencil lead or the brush. Those techniques include impression, dry wash, burnishing, erasing and using a solvent.

1. はじめに

近年、ノンフォトリアリスティックレンダリングは、コンピュータグラフィックス (CG) の重要なテーマとして、多くの研究がなされている。それらは、画家が描いたような雰囲気画像の生成 (painterly rendering) や、テクニカルイラストの自動生成、セルアニメーションのための技術などに分類される。我々は、その中でも、painterly rendering の対象の 1 つである、色えんぴつ画に注目している。色えんぴつは、本格的な美術作品のための補助的な手段として考えられがちであるが、パッケージデザインや絵本などにも使われ、独自の美術分野を形成するに至っている¹⁾。このような現状から、色えんぴつ画は CG の対象として

も注目に値すると考えられる。

既存のデジタルペイントツールのさまざまな機能を組み合わせることによって、色えんぴつ画風の画像を生成することは可能である。また、ブラシの一種として、色鉛筆を提供しているものも存在する。しかしながら、そのようなシステムで描いた場合、図 1 (a) のように、不自然な擦れストロークは生成できても、同図 (b) に見られるような実際の色えんぴつ画のように自然な擦れストロークの再現は困難である。

そこで我々は、色えんぴつ画らしさを得るために、画材の相互作用を考慮した、独自の色えんぴつ画ボリュームモデルを提案してきた^{2)~5)}。提案モデルは、データ型がボリュームで統一されている 3 つのサブモデル、すなわち、紙の微細構造モデル、顔料付着モデル、加水効果モデルから構成されている。紙の微細構造モデルでは、紙の地合い (texture, 表層の質感) に影響を及ぼす数種の成分を反映した紙の幾何学的データへ、ボクセル化 (3 次元スキャンコンバージョン)⁶⁾を適用して紙のボリュームデータを得る。その紙ボリュームへ、顔料付着モデル、加水効果モデルのボ

[†] 東京工業大学大学院情報理工学研究科計算工学専攻
Department of Computer Science, Graduate School of
Information Science and Engineering, Tokyo Institute
of Technology

^{††} お茶の水女子大学理学部情報科学科
Department of Information Sciences, Faculty of Sci-
ence, Ochanomizu University

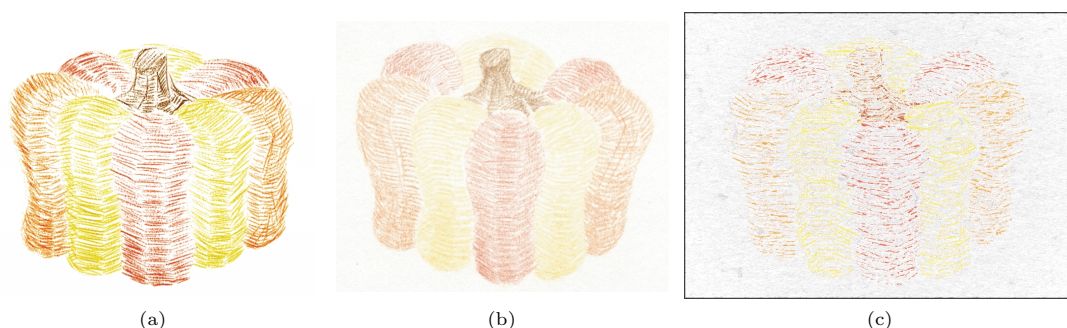


図 1 (a) 既存のデジタルペイントツール *Painter* の “色えんぴつ” ブラシを用いて描いた画像例, (b) 実際の色えんぴつ画例, (c) すでに提案した色えんぴつ画モデルから得られる画像例

Fig.1 (a) Image drawn with the “colored pencil” brush-function provided by *Painter*, an existing painting tool. (b) Actual colored pencil drawing. (c) Resulting image generated by our previous colored pencil drawing model.

リウムオペレーションを施すことによって, 色えんぴつ画を描画し, 色えんぴつ画ボリュームを得る. 各段階におけるボリュームデータのレンダリングには, 既存のボリュームビジュアライザ VolVis⁷⁾を利用した.

提案した色えんぴつ画モデルによって, 図 1(c) に示すような, 色えんぴつ画らしい, かすれた顔料付着状態が再現できた. しかしながら, 実際の色えんぴつ画には, さまざまな描画技法が存在し^{1),8),9)}, 色えんぴつ画独自の魅力を表現するためには, それらの描画技法の直接的な再現もまた重要であると考えられる. そこで, 色えんぴつ画の描画技法についてまとめ, すでに提案したモデルでは対応できない技法, すなわち, 色えんぴつそのものだけでなく, 他の用具を必要とする技法をモデリングする. 各技法のモデルは, 以前の色えんぴつ画モデルと組み合わせることにより, 専用のボリュームオペレータを提供する.

本論文では, まず次章で, すでに提案した色えんぴつ画モデルの概略を述べる. 続いて 3 章で, 色えんぴつ画におけるさまざまな技法とその効果についてまとめる. それらの技法のうち, 色えんぴつだけでは描けない技法のボリュームモデルを 4 章で提案し, 5 章に実験結果を示す. 以上のようにして, 実際の色えんぴつ画の豊かな表現力を再現するために, 周辺技法も重要な役割を演じていることを実証する.

2. ボリュームモデリングの基本方針

すでに提案した, 紙の微細構造モデル, 顔料付着モデル, 加水効果モデルからなる色えんぴつ画モデルの概略を述べる. これらは, 本論文で提案する技法モデルに基本的な枠組みを与えるものである. なお, より詳しい説明に関しては, 文献 2), 3) を参照してほしい.

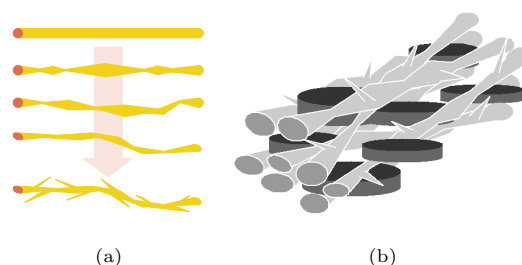


図 2 (a) 単体繊維モデルの段階的詳述化, (b) 紙の幾何データ
Fig.2 (a) Progressive refinement of pulp fiber primitive. (b) Geometrical data of paper.

2.1 紙の微細構造モデル

我々の紙モデルでは, 最初に, 画用紙の地合いを表現するうえで, 影響が強いと考えられるパルプ繊維や填料をプリミティブとするプリミティブインスタンスングを用いて, 紙を幾何学的にモデリングする.

パルプ繊維の単体プリミティブには, 基本形状として円柱を用い, 実際の製紙工程での処理の影響を考慮し, 単純な円柱のプリミティブへ, 図 2(a) のように, くびれ, 屈折, 偏平化, けばを付加し, 近似度を増している. パルプ繊維の単体プリミティブを, 基本的にはランダムであるが, 配向性を持つように多数配置する. 配置において, 干渉は考慮しない. これにより, 繊維が激しく割れて交差している実際のパルプをむしろより適切に表現できる.

一方, 填料の単体プリミティブには, 基本形状として円盤を用い, 繊維網へ充填する (図 2(b)). そのとき, すでにパルプが存在しているところではパルプを優先させ, 空隙や填料であったところへは填料の濃度を加算するという, ボリューム集合演算を行いながら充填する. このような充填方法によって, 実際の紙に

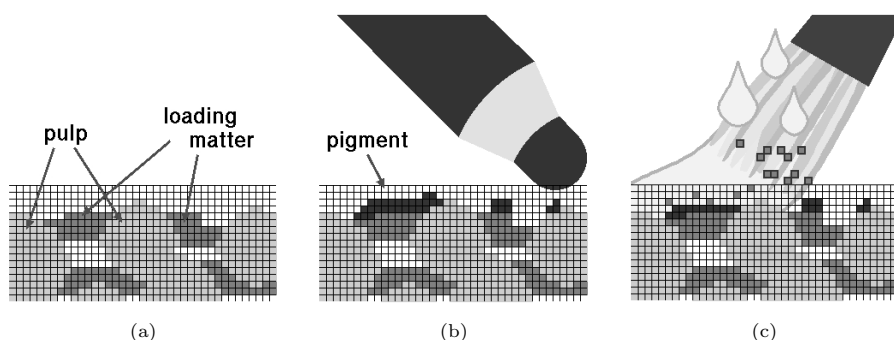


図3 ポリウムデータの鉛直断面図：(a) 紙, (b) 顔料付着, (c) 加水効果

Fig. 3 Schematic diagram in cross section: (a) paper volume, (b) drawing, (c) watering.

において、填料がパルプ繊維の方向性を妨げることなく分布している状態を表現できると考えられる。

以上のようにして作成した紙の幾何データをボクセル化し、規則格子を持つポリウムデータを得る(図3(a))。構成要素をフィールド値で識別できるように、単一要素の濃度を示す値域には制限を設ける。こうして生成された紙の微細構造を持つポリウムへ、描画オペレーションを適用する(図3(b), (c))。

2.2 顔料付着モデル

実際の色えんぴつ画のデジタルマイクロスコープによる観察から、顔料付着には2つのタイプがあると考えられる：(1) 紙の凸部分との摩擦のため、顔料が色えんぴつ芯から削りとられ、紙に付着する、(2) 色えんぴつ芯が、填料や顔料が占める領域上をなぞった場合、その上に顔料が付着する。1つのストローク内に両方の顔料付着が生じるが、その機構は異なるものであるため、個別に考慮する。

1番目の現象に対応する描画オペレーションは、以下のように構築した。まず、紙の凹凸検出に offset distance accessibility (ODA)¹⁰⁾を利用する。Accessibilityは、1970年代から化学の分野において使われてきた概念である。Millerが文献10)において、ハケ先を球状のprobeと仮定し、オブジェクト間に到達可能なprobe半径を用いて、accessibilityを定義した。ここでは、色えんぴつの芯先の半径をprobe半径とし、紙ポリウムや色えんぴつ画ポリウムのODAを計算する。計算したODAをもとに、運筆方向にスキャンし、到達不可能領域だった後に到達可能領域となった場合、現在のボクセルを運筆方向に対する紙の凸部分と判断し、顔料を削り取るボクセルと見なす。削られた顔料は、そのボクセルから運筆方向と逆方向に存在するボクセル上へ付着する。

2番目の現象に対応する描画オペレーションは、次のように構築した。芯先が紙をなぞるには、連続して

到達可能であることが必要なので、ODAが連続して0であるような領域が芯先によってなぞられると見なす。そして、連続到達可能領域中に存在するボクセルの要素が填料か顔料であるならば、そのボクセル上へ顔料を付着させる。分布する顔料の厚みは、填料の濃度や筆圧などから決定する。

2.3 加水効果モデル

水溶性色えんぴつ利用時には、筆に水を含ませて描画面をなぞるという、我々が加水と称している手法が多用される。加水を施すと、顔料の接着成分が水へ溶け、顔料が拡散し、ぼかしや混色の効果が得られる。接着剤の種類や、水量、筆圧、顔料の厚みなどによって溶け出し具合が異なるが、すべての顔料が溶け出すのではなく、不均一に付着していた痕跡は残る。

加水効果のモデリングでは、最初に、溶け出す可能性のある顔料ボクセルを決定する。道具として平筆を仮定し、筆の厚みをもとに決定したprobe半径を用いてODAを計算し、筆の到達可能領域を算出する。ストロークの通過領域内にある、到達可能なボクセルに顔料が含まれているならば、そのボクセルを溶け出す可能性のある顔料ボクセルと見なす。もともとの顔料に含まれる接着剤、水量、筆圧などから、実際に溶け出す顔料ボクセル、すなわち、ソースボクセルを決定する。さらに、ソースボクセルに接しているボクセルが顔料ボクセルならば、接着剤や水量、筆圧に応じて、ともに溶け出すとする。

顔料の移動は、独自に拡張した line integral convolution (LIC)¹¹⁾を用いてモデリングした。LICは、与えられた2次元のベクトル場から得られる局所流線に沿って、通過する各ピクセルの値を平均化し、中央のピクセルの新しい値とするフィルタリングである。kernelとして、平均化に貢献するピクセル群をとる。ここでは、高さ情報を加えた3次元へとLICを拡張し、運筆方向を局所流線に対応させ、kernelの長さや

表 1 色えんぴつ画の描画技法とその効果

Table 1 Techniques and effects in colored pencil drawing.

前処理	描画技法	効果
	紙ヘジェッソ☆1を塗る	質感の表現
	インプレッション*	白線の表現 ハイライト
	淡い色で下塗り	やわらかな印象
	グリザイユ☆2	深みのある陰影
主描画	描画技法	効果
	握り方による 異なる印象のストローク ランダムテクスチャ 線描	質感の表現
	フロッタージュ☆3	材質感のある模様
	ハッチング☆4	陰影
	クロスハッチング	グラデーション
	フリーハッチング	
	スティッピング（点描）	視覚的な混色 陰影
	フェザリング☆5	グラデーション 軽く明るい質感の表現
	重ね塗り	豊かな色調 グラデーション 陰影 混色
	ドライウォッシュ*	ぼかし 混色
	塗り込み	なめらかな質感
	塗り残し	ハイライト
仕上げ	描画技法	効果
	白などの淡い色で 描画面上を平らに塗る	つや出し
	こする*	つや出し ハイライト ぼかし 混色
	消しゴムで消す*	誤り修正 ハイライト
	サンドペーパーで削る	やわらかな印象 ハイライト
	スグラフィート☆6	白線 シャープな勢い、質感
	溶かす*	ぼかし 混色

* がついている技法は 4 章でのモデリング対象。

貢献するボクセルの算定、その貢献割合などで、色えんぴつ顔料の特性や運筆速度などに対応した加水効果を表現する。貢献割合の合計を 1 より小さく設定することで、紙に再付着することなく、筆によって顔料が取り除かれる状態も再現される。

3. 色えんぴつ画の描画技法

実際の色えんぴつ画には、さまざまな技法が存在する^{1),8)}。モチーフの選び方や構図のとり方、モチーフの持つ雰囲気や各自の画風に合った画材の選択方法、さらには、できあがった作品を保管するための処理も技法の 1 つといえる⁸⁾。しかしながら、ここでは、そのような、ものを描くときに共通な技法ではなく、色えんぴつ画に固有な、描画時の技法に注目する。

表 1 は、描画の過程別に一般的な技法とその効果をまとめたものである。ここで、前処理とは、それ自体はメインとなる描画ではなく、最終的な描画をしたときに、その効果が現れるような、下準備にあたるものを指す。また、仕上げには、少なくとも一度描画された領域に対して行う技法が分類してある。3 つの過程は、前の段階へ戻ったり、繰り返されたりし、また、前処理と仕上げは、必ずしも行われるとは限らない。

前処理にあげた 4 つの技法は、紙へ変形を加えるものと、下地となる描画を行うものとに分けられる。主描画の多くは、塗り方の違いから生じる技法である。仕上げに分類してある技法は、色えんぴつだけでなく、トーション（擦筆）⁷⁾や消しゴム、水や溶剤と筆など、別の画材を多用するものとなっている。また、表 1 から分かるように、技法とそれによって得られる効果は必ずしも 1 対 1 ではない。

4. 描画技法のモデリング

表 1 において、前処理における下地描画や主描画に分類されている、ストロークの与え方や塗り方に關する多くの技法は、すでに提案してある顔料付着モデル（2.2 節参照）を流用し、そのパラメータ値やストローク形状を変化させることで実現可能である。よって、本章では、顔料付着モデルでは対応しきれない、色えんぴつ以外の用具を用いる主な技法を 5 種類とらえ、各々をモデリングする。なお、ここで対象としている技法は、表 1 において * をつけてあり、図 4 にその実例を示す。

☆2 “グレーの基調”を意味するフランス語。あらかじめグレーなどの濃い色を塗ったベースの上に色を塗ることにより色に深みを持たせるといふ、古くから画家が用いていた手法。

☆3 ブロックや壁紙、段ボール、浮彫り模様などを紙の下におき、凸部を写し取る技法。

☆4 方向性を持つ線の集合で色合いや陰影を表現する技法。

☆5 線的なタッチで軽く色を重ねて描く、軽快な仕上がりの得られる技法。複数の色の線の重なりで、視覚的に色を混色する。

☆6 上の層を引っかき、下の層を出す技法。

☆7 片端が先細になるようにきつく紙を巻いたもの。

☆1 絵具の発色をよくする、白色の地塗り用絵具。筆やハケで塗り、その筆跡が新たな紙の質感となる。

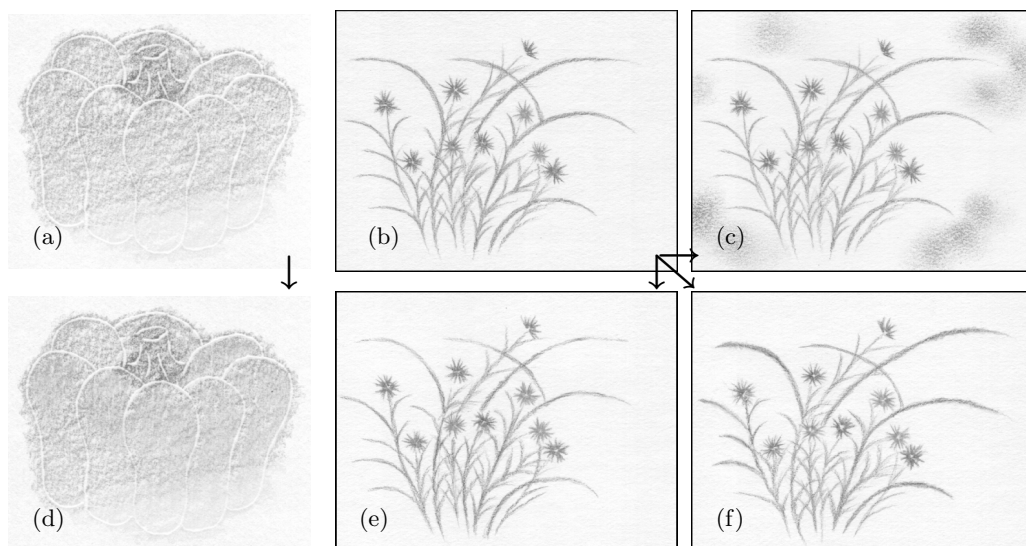


図4 実際の色えんぴつ画技法例：(a) インプレッション，(b) 色えんぴつ画（比較用），(c) ドライウォッシュ，(d) こする，(e) 消しゴムで消す，(f) 溶かす

Fig. 4 Effects of colored pencil drawing techniques: (a) Impression, (b) Colored pencil drawing (for comparisons), (c) Dry wash, (d) Burnishing, (e) Erasing, (f) Using a solvent.

4.1 インプレッション（前処理）

前処理技法の1つであるインプレッションは、テクスチャのような模様を生成するために用いられることもあるが¹⁾，多くの場合，レースや葉脈などの輪郭線や，細かなハイライトを表現するために用いられる^{8),9)}．画用紙にトレーシングペーパーなど薄手の紙を重ね，紙の色として残したい線をボールペンなどの先の堅いものでなぞり，凹線（impressed line）をつける．その後描画を行うと，色のついた領域に，紙の白い色が線状に残る．これがインプレッション効果である．図4(a)では，かぼちゃの輪郭線を凹線で描いた後，色えんぴつを比較的倒した状態で塗り，インプレッション効果を得ている．とがった色えんぴつを用いて凹線をなぞれば，後から色をつけることも可能である．このように，インプレッションは，なめらかなグラデーションで描きたい領域へ，異なる薄い色の線を明確に描きたいときなどに有効な手法である．

現実のインプレッション効果を再現するため，以下のような凹線描画モデルを提案する．凹線用ストロークは，始点，終点，幅，筆圧のパラメータで定義し，筆圧をもとに，紙ボリュームが鉛直方向へ圧縮される厚さを設定する．ストロークの下に位置する紙ボリュームの厚みが，圧縮されるべき厚さに達するまで，上の層から下の層へ鉛直方向に以下の処理を繰り返し行う：(1) 空隙があれば詰める，(2) 繊維が連続していたら，2つのボクセル濃度を足し合わせて詰める，(3)

填料が連続していたら，2つのボクセル濃度を足し合わせて詰める．(2)，(3)で濃度が100%を超えるような場合には足し合わせない．(1)から(3)を行っても，設定された厚さに達しない場合，上の層から順にボクセル値をシフトさせ，下部の層を破棄する．この場合，質量が保存されないが，水平方向への濃度圧縮を考慮することで解決可能である．

4.2 ドライウォッシュ（主描画）

ドライウォッシュとは，カッターなどを用いて色えんぴつ芯をなるべく細かな粉末に削り，その粉を指やティッシュペーパーなどに取り，紙に擦り込む技法である．デリケートなぼかしを表現でき，また，粉末の状態で混ぜ合わせれば，簡単に混色できる．この技法は，背景などの広い面を均一にぼかしたいときに用いられ，後から色えんぴつで描きこんで，調子を整える場合もある．図4(c)に，同図(b)の背景へドライウォッシュを適用した実色えんぴつ画例を示す．

ドライウォッシュのモデリングでは，色えんぴつ芯を削って粉末にする過程を省略し，適量の粉末状態の色えんぴつ芯が指の腹についており，それを紙へこすりつけると仮定する．指の腹の接地面は楕円形と仮定し，楕円の中心座標，長軸，短軸と中心座標における圧力をパラメータとして与える．指の腹は，繊維の細かな凹凸をなぞれないことや，粉末が細かいことから，一定厚み以上の紙の構成要素上へ顔料が付着するものと簡略化して考えることができる．しきい値となる紙

の一定厚みは、楕円の中心圧力をもとに決定し、顔料が付着する領域は、しきい値より表層に存在するボクセルのうち、粉末の直径以上の深さを持つパルプ繊維のくぼみ上と、height fieldを与えている填料ボクセル上とする。実際の指の腹における圧力は、中心から離れるにつれて軽くなるように分布していると考えられるので、付着する顔料の濃度は、色えんぴつを持って描いた場合の1ストロークの最高濃度を10とした場合、楕円の2焦点からの距離の和をもとに、中心部は4、周辺部は2となるように段階的に薄めていく。また、顔料の付着箇所を周辺部ほどまばらにするため、ガウス分布状となるように確率分布を与えている。

4.3 こする（仕上げ）

色えんぴつで塗った領域を強くこすると、艶のある色味になる。これは、強くこすることで、色えんぴつ芯に含まれるロウ成分の艶が増すためであり、色えんぴつ画独特の技法といえる。こする道具として、硬めの消しゴム、擦筆のほかに、ティッシュペーパー、綿棒、指なども用いられる。こする領域に塗ってあった色や塗りの厚さなどにより、その効果は、つや出し、ハイライト、ぼかし、混色などとなって現れる。図4(a)の色えんぴつ画のかぼちゃのうねのうち、手前の左上半分と右半分とへ、こする操作を加えた実例が同図(d)である。(a)に比べ、こすられて艶のある色になっている。

こする操作のモデリングでは、こする道具を消しゴムと仮定している。消しゴムが軟らかいほど、紙との接触量が増えるため、消しゴムの軟らかさをprobe半径の小ささへ反映させる。決定したprobe半径を用いてODAを計算し、消しゴムの到達可能範囲に存在する顔料の算出に利用する。こする操作によって移動する顔料は、消しゴムに吸着した顔料のかたまりのうち、直接消しゴムに吸着していない顔料とする。その移動は、LICに、消しゴムの軟らかさなどのパラメータを貢献割合の計算に加えた、独自の拡張を施したアルゴリズムを用いている。軟らかい消しゴムや圧力が高い場合には、貢献割合の合計を低めに設定することで、消しゴムによって除去される量を増やし、硬い消しゴムや圧力が低い場合には、LICのkernelを長く設定することで、顔料の移動距離を長くしている。溶かす効果においても、顔料移動にLICを用いているが、こする効果の方が、全体的に顔料の移動距離が短くなっている。さらに、加えられた圧力に応じて、顔料移動後の高さにしきい値を定め、しきい値を超えないように、鉛直方向に位置するボクセルの顔料濃度を足し合わせ、顔料が移動した後の面が、凹凸が少なく、なめ

らかになるような制限も加えている。

4.4 消しゴムで消す（仕上げ）

前節のように、こするのではない場合、消しゴムは、色えんぴつ画の表面を軽く叩くように使われ、誤り訂正だけでなく、ハイライトの生成や、顔料を薄く残すことによる、やわらかな印象の生成に用いられる。図4(e)では、同図(b)とほぼ同様に描いた色えんぴつ画の植物の葉先へ薄く消す操作を施し、やわらかな印象を生成している。これらの効果は、最初からある領域を塗らなかつたり、薄く塗ったりするのでは、得られにくい効果である。

まず、消しゴムの形状は楕円体と仮定し、軟らかさ、圧力を示すパラメータを設ける。除去される顔料を算定するために、顔料付着モデルなどと同様に、ODAを用いて消しゴムの到達範囲を算出する。probe半径は、こする場合と同様に、消しゴムの軟らかさをもとに設定される。消しゴムは鉛直方向だけに動くと仮定し、到達可能な顔料領域の上層ボクセルに含まれる顔料が消しゴムに吸着し、除去される。すなわち、除去される顔料を含むボクセルの値が、空気を表す値に変更される。除去される顔料層の厚みは、消しゴムの軟らかさや加えられる圧力から決定される。

4.5 溶かす（仕上げ）

水溶性色えんぴつだけでなく、油性色えんぴつでの描画にも、溶かすという技法が存在する。水溶性色えんぴつの場合には、筆に水を含ませて描画面をなぞるが、メルツ液やテレピン油を含ませた筆や布、また、無色の混色用マーカーペンなどを用いれば、油性、水溶性を問わず、芯材を溶かすことができる¹⁾。用いる画材の組合せによって、溶け具合が異なるが、すでに提案した加水効果モデル(2.3節参照)におけるパラメータ値の調整で対応可能といえる。なお、図4(f)は、同図(b)とほぼ同様に描いた色えんぴつ画の植物の葉先へ溶かす操作を施した実色えんぴつ画例である。

5. 実 験

前章で述べた描画技法モデルの実行例を示す。実験に使用したハードウェアは、SGI社製O2システム(CPU: R5000PC, Clock: 180 MHz, RAM: 256 MB)である。また、ボリュームビジュアライザとして、ニューヨーク州立大学Stony Brook校Visual Computingセンターで開発されたVolVis⁷⁾バージョン2.1を利用した。なお、VolVisでは1ボクセルあたり8bitのボリュームデータだけ扱うことができる。

描画技法を適用する対象となる紙ボリュームや色えんぴつ画ボリュームは、2章で述べたモデルに基づき、

生成した。図5の紙ボリュームでは、 $1,024 \times 768 \times 10$ のボリュームデータ内に基本半径2, 基本長500のバルブ繊維プリミティブ25,000本と、基本半径20, 基本厚6の填料プリミティブ24,162個とを発生させてあり、その体積比は、繊維70.837%, 填料29.160%となっている。図6の紙ボリュームでは、 $2,048 \times 1,536 \times 6$ のボリュームデータ内に基本半径4, 基本長500のバルブ繊維プリミティブ25,000本と、基本半径30, 基本厚6の填料プリミティブ14,582個とを発生させてあり、その体積比は、繊維70.500%, 填料29.343%となっている。顔料を加えた場合のボリュームデータサイズはそれぞれ、 $1,024 \times 768 \times 16$ と $2,048 \times 1,536 \times 12$ となっている。現行システムでは、ストロークの位置データはマウス入力から生成されており、ストローク幅や筆圧などは現在のところ経験値を与えている。図5, 図6は、生成したボリュームデータをVolVisのボリュームレイトレーシング機能を用いてレンダリングした結果である。画像サイズはいずれも 800×600 で、レンダリングには、図5では10分、図6では9分20秒程度を要した。

まず、図5(a)にインプレッション効果適用ボリューム例を示す。これは、生成した紙ボリュームへ、かぼちゃの輪郭線をインプレッションのための凹線描画モデルで描き、顔料付着モデルを用いて、色えんぴつを斜めに倒して描いたような描画を施した例である。図1(c)と同じモチーフであるが、描き方によって異なる印象を与える結果となっている。図4(a)の実色えんぴつ画と比較すると、やや凹線が明瞭ではないが、インプレッション効果が再現できている。

次に、図5(a)の色えんぴつ画ボリュームへ、こする効果を施した例を図5(b)に示す。かぼちゃのうねのうち、左側2つと右側1つの上部に対し、こする効果モデルが適用されている。顔料が平たく広がり、光沢感が表現されている。

図6には、別のモチーフを描いた色えんぴつ画へ他の技法を適用した例を示す。まず、顔料付着モデルを用いて、色えんぴつ画ボリュームを得た(同図(a))。その背景に、ドライウォッシュを適用したのが同図(b)である。色えんぴつ粉末の直径は1ボクセルとして計算している。無地の背景にやさしい雰囲気加わっている。また、同図(a)の色えんぴつ画ボリュームへ消しゴムで消す効果を施したものが、同図(c)である。植物の葉の先端部分付近へ消す処理が適用され、もとの色えんぴつ画にある細く鋭い葉の勢いが、葉の色が薄くなったことで弱められ、やわらかな印象を与えている。同じく、溶かす効果を加えたものが、同図(d)

である。植物の葉の先端部分に対して筆ストロークを適用したことで、葉がにじんで、ぼけたように表現されている。図4(c), (e), (f)の実際の色えんぴつ画を用いて、同様のストロークで描いた色えんぴつ画と比較してほしい。

6. ま と め

すでに提案した色えんぴつ画モデルをもとに、代表的な描画技法モデルを構築した。対象とした技法は、色えんぴつ以外の用具を用いるため、以前の色えんぴつ画モデルでは対応できないものである。新たに提案した描画技法モデルも、すでに提案した色えんぴつ画描画モデルと同様に、専用ボリュームオペレーションを提供した。提案した描画技法モデルに基づき生成された色えんぴつ画のボリュームデータを、既存のボリュームビジュアライザを用いて写実的に表現した。得られた画像には、現実の色えんぴつ画の描画技法との定性的な一致がみられ、色えんぴつ画の幅広い表現力を以前よりも再現できるようになった。

表1にあげた描画技法で、ストロークの与え方によらない技法の中に、まだモデリングしていない技法がいくつか存在する。それらは、実際の利用率が低いいため、今回のモデリング対象としなかったが、色えんぴつ画の魅力を実に再現するために、残された技法のモデリングも今後行う予定である。また、顔料付着モデルで対応可能と判断した技法のうち、色を塗り重ねることによって得られる深みのある陰影などは、現在利用しているボリュームレンダラでは表現できない。それは、絵の具特有の混色計算モデルが組み込まれていないからである。その他にも、より色えんぴつ画らしい画像生成のために、多くの色を用いる色えんぴつ画という対象に適したデータ構造や、薄膜多層構造に適した専用の照明モデルを組み込んだ、独自のレンダリングシステムの構築を予定している。

また、現行システムでは、ストロークデータを生成する部分と、レンダリング部分とが分離しており、ストロークの位置データを、適当な画像上に描く状態になっている。ボリュームデータ上に直接描かないのは、ボリュームデータのレンダリングに時間がかかるためである。その解決策として、色えんぴつ画データの更新と再レンダリングを、ストロークの通過部分に限るという、逐次更新法¹²⁾があげられる。また、ボリュームレンダリング用PCIボード¹³⁾を用いてレイキャスティング法でレンダリングするならば、対話的な時間内でのレンダリングが可能になると考えられる。よって、加筆時にはレイキャスティング法でレンダリング

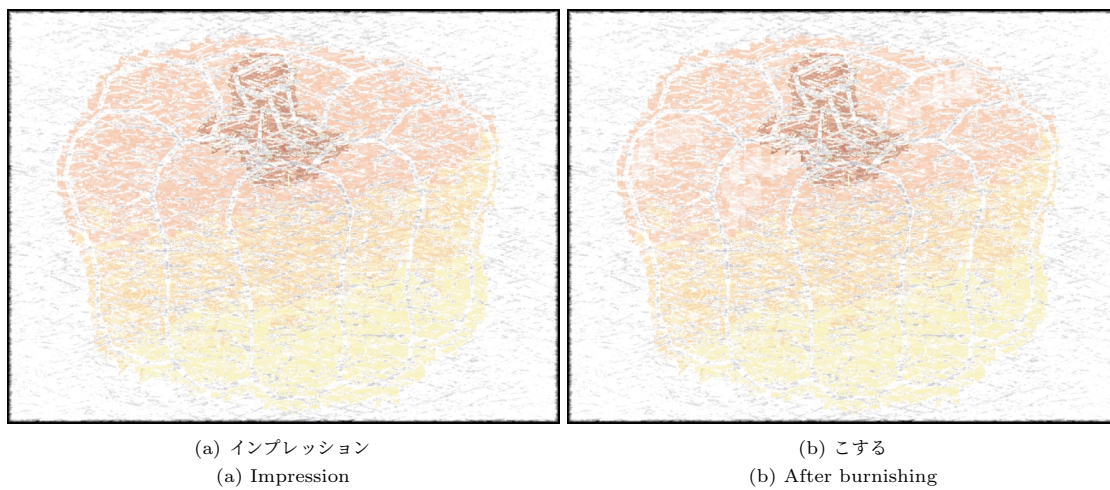


図5 南瓜
Fig. 5 Pumpkins.

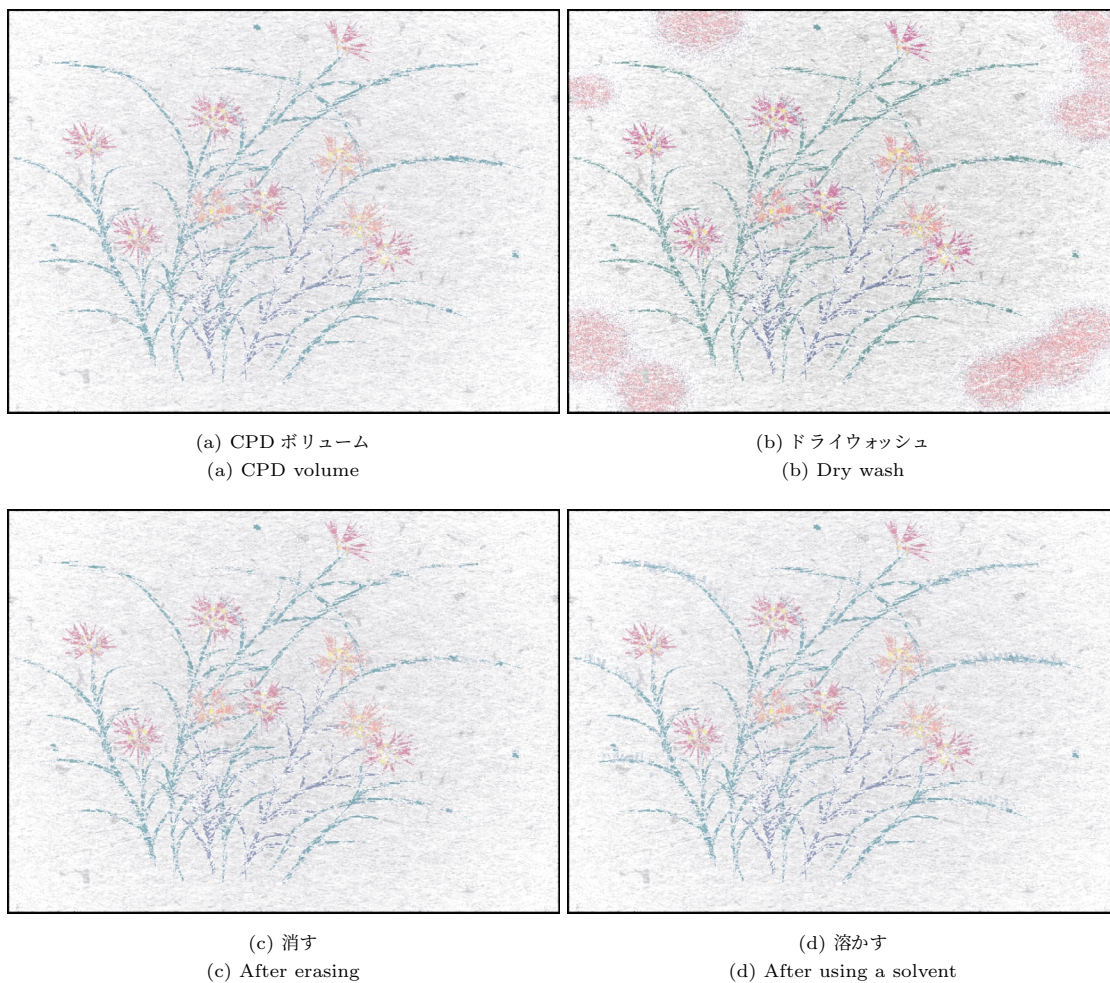


図6 草花
Fig. 6 Flowering plants.

し、最終的にレンダリングを行うときだけ、計算時間のかかるレンダリング手法でレンダリングするという方法もあげられる。

謝辞 本研究の一部は、日本学術振興会特別研究員制度および文部省科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の助成による。

参 考 文 献

- 1) Hutton-Jamieson, I.: *Colored Pencil Drawing Techniques*, North Light Books (1986).
- 2) Takagi, S. and Fujishiro, I.: Microscopic structural modeling of colored pencil drawings, *The Art and Interdisciplinary Programs of ACM SIGGRAPH97 (Technical Sketches)*, p.187 (1997).
- 3) 高木佐恵子, 藤代一成, 中嶋正之: 色えんぴつ画のポリウムモデリング, 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.3, pp.1177-1187 (1999).
- 4) Takagi, S., Fujishiro, I. and Nakajima, M.: Volumetric modeling of artistic techniques in colored pencil drawing, *Conference Abstracts and Applications of ACM SIGGRAPH99 (Technical Sketches)*, p.283 (1999).
- 5) Takagi, S., Fujishiro, I. and Nakajima, M.: Volumetric modeling of colored pencil drawing, *Proc. Pacific Graphics '99*, pp.250-258 (1999).
- 6) Kaufman, A., Cohen, D. and Yagel, R.: Volume graphics, *IEEE Computer*, Vol.26, No.7, pp.51-64 (1993).
- 7) Avila, R., He, T., Hong, L., Kaufman, A., Pfister, H., Silva, C., Sobierajski, L. and Wang, S.: VolVis: A diversified volume visualization system, *Proc. IEEE Visualization '94*, pp.31-38 (1994).
- 8) Martin, J.: *The Encyclopedia of Colored Pencil Techniques*, Running Press (1997).
- 9) Borgeson, B. and Borgeson, E.: *The Colored Pencil (revised edition)*, Watson-Guption Publications (1995).
- 10) Miller, G.: Efficient algorithms for local and global accessibility shading, *Proc. ACM SIGGRAPH94 (COMPUTER GRAPHICS Annual Conference Series)*, pp.319-326 (1994).
- 11) Cabral, B. and Leedom, L.C.: Imaging vector fields using line integral convolution, *Proc. ACM SIGGRAPH93 (COMPUTER GRAPHICS Annual Conference Series)*, pp.263-272 (1993).
- 12) Hong, L., Mao, X. and Kaufman, A.: Interactive visualization of mixed scalar and vector fields, *Proc. IEEE Visualization '95*, pp.240-247 (1995).
- 13) Pfister, H., Hardenbergh, J., Knittel, J., Lauer, H. and Seiler, L.: The VolumePro Real-

Time Ray-casting System, *Proc. ACM SIGGRAPH99 (COMPUTER GRAPHICS Annual Conference Series)*, pp.251-260 (1999).

(平成 11 年 9 月 10 日受付)

(平成 12 年 2 月 4 日採録)

高木佐恵子 (学生会員)



昭和 48 年生。平成 10 年お茶の水女子大学大学院理学研究科情報科学専攻修了。同年東京工業大学大学院情報理工学研究科計算工学専攻博士後期課程入学。現在に至る。デジタルペイントシステムやポリウムグラフィックスに興味を持つ。平成 11 年日経サイエンス社主催第 5 回 Computer Visualization Contest 優秀賞 (JIP 賞) 受賞。ACM 会員。

藤代 一成 (正会員)



昭和 35 年生。昭和 60 年筑波大学大学院博士課程工学研究科電子・情報工学修士号取得退学。同年東京大学理学部情報科学科助手。その後、筑波大学電子・情報工学系を経て、平成 3 年よりお茶の水女子大学理学部情報科学科助教授、平成 10 年より同教授、現在に至る。平成 6 年より 1 年間、米国ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校客員教授を併任。平成 9 年より、財団法人高度情報科学技術研究機構特別招聘研究員を兼務、現在に至る。理学博士 (東京大学)。ビジュアルコンピューティング、特に、ポリウムビジュアライゼーション/グラフィックスとその応用に興味を持つ。著書に「CAD/CAM」(丸善)ほか。IEEE Computer Society, ACM 等会員。

中嶋 正之 (正会員)



昭和 21 年生。昭和 44 年東京工業大学工学部電気工学科卒業。昭和 50 年同大学院博士課程修了。同年同大学勤務。昭和 58 年同大学情報工学研究施設助教授。現在同大学院情報理工学研究科計算工学専攻教授。工学博士。デジタル画像処理およびコンピュータグラフィックスの研究に従事。著書に「グラフィックスとマンマシンシステム」(岩波書店, 共著), 「コンピュータグラフィックス」(昭晃堂, 共著), 「画像情報処理」(森北出版, 共著), 画像処理関連多数有。平成 9 年映像情報メディア学会業績賞, 平成 10 年情報処理学会ベストオーサーズ賞受賞。