

水彩画調パースレンダラの開発（継続）

千 葉 則 茂 岩手大学 工学部 教授

1 はじめに

本研究では、3次元幾何モデルから水彩画調パース図を自動生成するための3次元CG技術、特にレンダリング技術の開発を行うことを目的として、昨年度は、主に建築物および樹木の3次元モデルから水彩画調パース図を作成する技術を開発した。今年度は、この昨年度開発の技術と、以前から行っていた墨のセルオートマトンモデルの研究をベースに、広く筆画調レンダリング法に適用可能な技術として、主に以下のような技術開発を行った。

- (1) 既開発のセルオートマトンによる墨の振る舞いのモデルを用いた「点法および皴（しゅん）法の水墨画調レンダリング法」
- (2) (1)の拡張としての「セルオートマトンによる絵の具の振る舞いのシミュレーション法」
- (3) カラー画像の領域分割法と(2)を用いた彩色法による「筆画調画像加工法」

なお、(1)は「3次元モデルからのストローク生成法」を、また(2)は「顔料の発色モデル」を含んでいる。(3)は、もちろんCG画像にも適用可能なので、3次元モデルからの筆画調レンダリング法としても利用可能な技術である。

本稿では、これらの技術について解説するが、技術の詳細については公表論文を参照していただきたい。

2 点法および皴法の水墨画調レンダリング法

2.1 水墨画の基本的な表現法

水墨画において良く用いられる基本的な表現技法には、没骨法、白描法、せん染法などがある^[1-4]。

- (a) 没骨法：線描きをせずに、一筆で一気に物体の形を描く表現法
 - (b) 白描法：線描のみによって主に物体の輪郭を描く表現法
 - (c) せん染法：線描によって輪郭を描きその上に皴（しゅん）や点でせん染する（ぼかす）表現法
- 樹木や草本などの表現には没骨法が用いられることが多く、山水画などはせん染描法で描かれることが多い。

2.2 点法および皴法調レンダリング法

本手法では、墨・水粒子の移動・拡散モデルおよび、筆と紙のモデルは既提案手法^[5]と同じモデルを用いる。このモデルでは、2次元セルオートマトンによって隣接セル間における墨と水の振る舞いと、筆から紙への墨の伝播、濃度平衡、蒸発などをシミュレーションすることにより、基本的な筆跡の生成が可能である。せん染描法を表現するためには、物体の輪郭を描くための筆のストロークと、物体表面の質感などを点や皴で表現するための筆のストロークを生成しなければならない。ここでは、これらのストロークをポリゴンベース幾何モデルから得るための手法について説明する。

(1) 輪郭部分のストローク生成法

輪郭部分の筆のストロークの生成は、まず、ポリゴンに対してレイトレーシングを適用し、輪郭線抽出に必要な情報をスクリーンの各ピクセルに保存する。次に、スクリーン全体を走査し、輪郭を構成しているピクセルすべてを登録する。そして、輪郭の細線化処理を行った後、スクリーンを左上から順に走査し、輪郭のピクセルを1つ見つけ、そこから輪郭のピクセルをトレースして筆のストロークとして登録する。トレースされていない輪郭のピクセルについて同様の処理を繰り返す、という手順によって行っている。

(2) 陰影部分のストローク生成

輪郭を描いた後、その内側を点法や皴法で描き表面の凹凸や質感を表現する。点法は、一定の大きさの点、または大きさの異なる横点を重ねていくことで表現する。皴法は、表面の傾斜をなぞるような方向に筆を走らせることにより表現する。以下にこれらの手順を説明する。

(2-1) 点法のストローク生成法

点法には様々な種類のものがあるが、本手法では、最も基本的な米粒状の横点を用いた。点描のストロークを生成するために図1(a)のような、点法におけるすべてのストロークの基本となる形状のストロークを用意する。基本ストロークを以下の手順に適用し、点法のストロークを生成する。

Step 1 ストロークの開始点を、ディスク半径可変としたポアソン・ディスク・サンプリング法を用いて生成する。ポアソン・ディスク・サンプリング法は、サンプリング点の半径内に他のサンプリング点が入り込まないように点を発生させる方法である。ディスク半径はサンプリング点に登録された濃度値をもとに求める。

Step 2 各開始点における点の大きさを決定する。点の大きさは、基本ストロークに、物体までの距離が近ければ大きく、遠ければ小さくなるような倍率を掛けることにより求める。

Step 3 生成された点列をストロークとして登録する。

開始点生成の際に濃度値に基づいてディスク半径を制御することにより、明るい部分は疎に、暗い部分は密に点が打たれるようにできるため、反射光の情報を反映することができる。

(2-2) 皴法のストローク生成法

点法同様に皴法にも様々な描き方があるが、ここでは面の凹凸や質感を表現するため、傾斜をなぞるように筆を走らせるものとする。皴法のためのストロークは、点法と同様に図1(b)のような基本ストロークを用意し、以下のアルゴリズムによって幾何モデルから抽出する。

Step 1 輪郭線検出の場合と同様にレイトレーシング法を用いて奥行き値、輝度値の情報をスクリーンのピクセルに登録する。さらに、視線ベクトル E とポリゴンの法線ベクトル N の両方を含む平面と、ポリゴンとの交線を傾斜方向とみなして、そのベクトルをスクリーンへ投影し、単位ベクトル化してピクセルへ登録する。すなわち $E \times N \times N$ ($\times$ はベクトルの外積) をスクリーンへ投影し、投影されたベクトルを単位ベクトル化する。このようにして得られたベクトルの集まりは、傾斜方向を表すベクトル場となる。

Step 2 点法の Step 1 と同様の方法でストローク始点の候補点を生成する。

Step 3 各始点の候補点において、その点を開始点として、傾斜方向を表すベクトル場を、以下の条件の1つを満たすまでトレースする。

[条件1] ループを形成した。

[条件2] 現在のピクセルと次の点のピクセルに登録された奥行き値の差が一定値以上になった。

[条件3] 物体の存在領域外に出た。

[条件4] ストロークの長さが一定以上になった。

Step 4 点法の Step 2 と同様の方法でストロークの倍率を決定する。

Step 5 生成された点列をストロークとして登録する。



(a)点法

(b)皴法

図1 基本ストロークの形状

2.3 水墨画調レンダリング法の実行例

生成したストロークを筆と紙のモデルに適用することにより、水墨画調画像を生成する。なお、遠近感を表現するため、各ストロークを描画する時に筆に含ませる水と墨の量を、遠くにあるストロークほど水の量を多く墨の量を少なく、近くにあるストロークほど水を少なく墨を多くし、濃く描くようにしている。

図2にベクトル場の生成例を示す。図3は山岳と樹木の2種類の物体を同時に描画した例である。実際的水墨画では、全体を淡い墨で描き、その上からより濃い墨を重ねて描くことで物体や遠近を強調することがある。図3では、この表現のため、薄い墨によって、明暗の差を小さくして一度全体を描き、さらに、その上から濃い墨によって明暗の差を大きくして描いている。

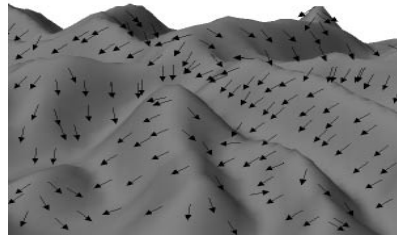


図2 傾斜方向のベクトル場



(a)通常の陰影画像

(b)点法による生成例

(c)皴法による生成例

図3 樹木と山岳の水墨画調レンダリング例

3 セルオートマトンによる絵の具の振る舞いのシミュレーション法

3.1 セルオートマトンモデル

本研究で用いたセルオートマトンモデルは絵の具と水を格納できるタンクの2次元配列であり、ノイマン近傍（4近傍）のセル同士をパイプで接続した図4(a)のような構造になっている。また各セルの構造は図4(b)のようなになっている。

ある位置 $o(i,j)$ のセル $p_{(i,j)}$ の状態は以下の変数によって表される。

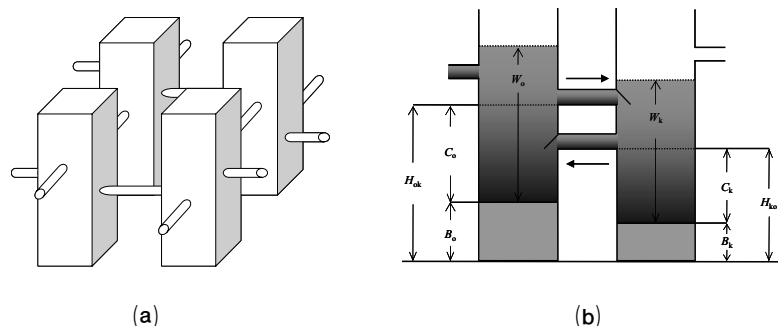


図4 セルオートマトンモデル

- ・水の量： $W_{(i,j)}$
- ・絵の具粒子の量： $Ink_{(i,j)} = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$
- ・定着した絵の具粒子の層： $L_{(i,j)}$

ここで、 n は用いる絵の具の色数である。位置 $o(i,j)$ のセルを p_o と記すことにすると、すなわちある時刻 t におけるセル p_o の状態 $S_o(t)$ は、

$$S_o(t) = (W_o(t), Ink_o(t), L_o(t)) \quad (1)$$

で表すと、ある時刻 t から 1 ステップ後の状態 $S_o(t+1)$ は状態の遷移関数 f によって以下のように表される。

$$S_o(t+1) := f(S_o(t), S_k(t)) | k \in neighbor \quad (2)$$

ここで、 $neighbor$ は 4 近傍セルのインデックスの集合である。また記号 $:=$ は各時間ステップでの更新を示す。状態遷移関数 f は次のような手続き (Step) を適当な回数ずつ実行することにより実現する。

Step 1：水の移動・拡散処理

Step 2：水の流れによる絵の具粒子の移動

Step 3：濃度平衡作用による絵の具の移動

Step 4：水分の蒸発・絵の具の定着

各ステップの式を用いた詳細な説明は文献^[6]を参照されたい。

3.2 紙モデル

水彩画においては紙の目の違いによって絵の具の定着の仕方が異なる。本手法では紙の目をセルの底の高さと容量、及びパイプの高さによって表す。これらの値を決めるための方法は様々考えられるが、本手法では、文献^[5]で提案されているランダムな線分により繊維の分布を決定する方法、その線分の傾きを限定する方法、また紙の目の凹凸に注目し、 $1/f^b$ ノイズの高域周波数帯により生成する方法、及びこれらを組み合わせた方法を用いた。図 5 (a), (b), (c) に基準面からの底の高さを紙の高さとした場合の高さの値をグレースケールで表した紙の生成例を示す。(a) は一様乱数により傾きを生成したもの、(b) は $\theta = 90^\circ$, $\theta = 0^\circ$ に傾きを制限したもの、(c) は $-45^\circ < \theta < 45^\circ$ に傾きを制限したものであり、(d) に $1/f^b$ により生成した場合、両者を組み合わせた場合の生成例を (e) に示す。

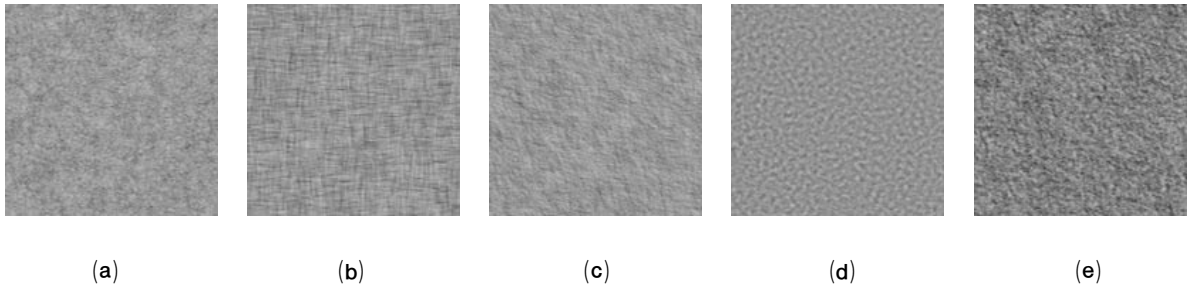


図 5 紙のモデル (グレースケール表示)

3.3 重色と混色のモデル

ここではセルオートマトンモデルから得られた絵の具の量から紙の上で観測される絵の具の色を決めるための混色・重色モデルについて述べる。セルに含まれる絵の具 Ink_o に含まれる各 I_m はそれぞれ CMY 表色系で表される色 $Col_m(c, m, y)$ を持っている。本研究で用いた絵の具の種類とそのパラメータを表 1 に示す。各パラメータは市販の絵の具のラベル色を参考に決定した。以下に各セルの色を決定する手続きについて述べる。前述のように透明水彩はあらかじめ絵の具を塗った領域にさらに絵の具を塗り重ねた場合は下に塗られている色が透けて見えるという特性がある。これを単純に、セル P_o の色 Col_o を、

$$Col_o = a Col_o^{wet} \Theta (1 - a) Col_o^L$$

表1 サンプル色とパラメタ

Color name	C	M	Y	color
Vermilion HUE	6	192	213	
Permanent Green NO.1	136	88	198	
Prussian Blue	248	216	175	

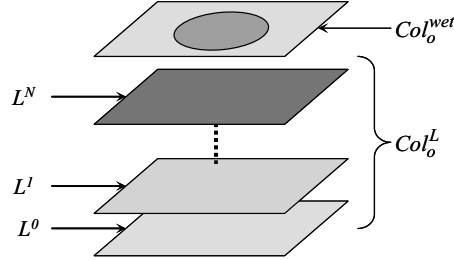


図6 絵の具の層

で表す。ここで、 Col_o^{wet} はセル P_o のまだ定着していない部分の色、 Col_o^L はセル P_o の定着した絵の具の層を表すリスト L_o から求められる色である（図6）。また、 a はそのセルにある絵の具粒子の総量により決まる透明度、記号 Θ はそのセルでの減法混色を表す演算子とする。透明度 a を以下のように定義する。

$$a = \min(1, Col_o^{wet} / Col_{max})$$

Col_{max} は下の層を覆い隠すことが出来る最小の絵の具の量である。実際の絵の具では絵の具の色により下の層を覆い隠す能力にもばらつきがあるが、計算の簡略化のためここでは絵の具の粒子にはばらつきがないものとする。つまりすべての色の絵の具はある量 Col_{max} で下の層を完全に覆い隠すことが出来るとする。水の存在する部分の色 Col_o^{wet} は、セルの中では各色の絵の具粒子は等濃度で分布していると仮定して、単純にセルに存在する絵の具の量から減法混色により求める。

$$\begin{cases} Col_o^{wet} = q_1 \cdot I_1 \Theta q_2 \cdot I_2 \cdots \Theta q_m \cdot I_m \cdots \Theta q_n \cdot I_n \\ q_m = \min(1, I_m / Col_{max}) \end{cases}$$

また、 Col_o^L は以下の計算により求められる。

$$i=0 \text{ から } N \text{ まで繰り返す} \\ Col_o^{L^i} = a Col_o^{L^{i-1}} \Theta (1-a) Col_o^{L^{i-1}}$$

ここで L^0 は一番下の層を表し、 L^N は定着した絵の具の一番上の層である。

図7に混色と重色のシミュレーション結果を示す。(a)、(b)はどちらも単色の絵の具を3重に塗り重ねたものであるが、(a)はまだ水があるうちに次のストロークが置かれた例、それに対し(b)は前のストロークが完全に乾いてから次のストロークが追加されたものである。ただし、実際には、あとからの筆が先におかれた絵の具をぬぐい去ってしまうので実現が難しい。理想的な条件でのシミュレーションである。(c)、(d)は同じシミュレーションを各ストロークの絵の具の色を変えながら行った例である。(a)と(c)はストロークの交差部分が減法混色で交じり

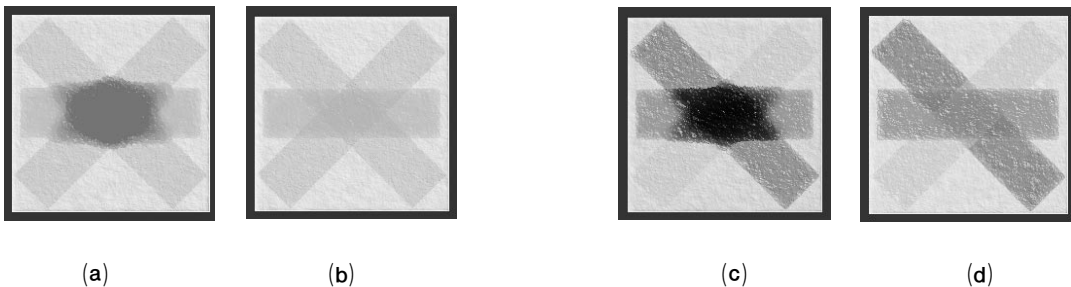


図7 混色と重色のシミュレーション例

合っているが、(b)と(d)は先に描かれたストロークの色が絵の具の量に応じて透けて見えているのがわかる。

3.4 セルオートマトンモデルによる筆画調加工法

絵の具モデルの絵画調画像生成への応用として、以下のような絵画調加工を行うツールを開発した。入力 RGB 各256階調のカラー画像とし、計算に用いる絵の具の種類はカラー画像から絵の具の量への変換の簡単化を図るため I_0 : シアン, I_1 : マゼンタ, I_2 : イエローの3色とした。

Step 1: 入力画像と同じ解像度 (セル数) のセルオートマトンモデルを用意する。この際に、紙の構成、水の分布は任意に指定できる。

Step 2: 入力画像を $L^*a^*b^*$ 表色系へ変換後、色差により領域分割する。領域分割には画像内にサンプル点をランダムに発生させ、その点を中心とした任意の領域内で色差が一定の範囲内であれば同一領域であるとする。

Step 3: 領域ごとに参照画像から絵の具の量を求め絵の具モデルへの入力とする。絵の具の量は画像の RGB 値を CMY 表色系へ変換した場合の各値 (c, m, y) を単純に

$$\begin{cases} I_0 = c \\ I_1 = m \\ I_2 = y \end{cases}$$

として入力する。

Step 4: 生成されたすべての領域ごとに絵の具の振る舞いのシミュレーションを適用し画像を生成する。

3.5 適用例

図8にデジタルカメラで撮影した画像への適用例を示す。(a)に入力画像、(b)に領域分割の結果を、(c)に各領域の平均色を代表色とする変換手法を、(d)に本手法の適用例を示す。(e)に(d)の一部分の拡大図を示す。画像が小さいとわかりにくいですが、セルオートマトンモデルの効果により領域内の色を単純に平均化するよりも絵の具らしく

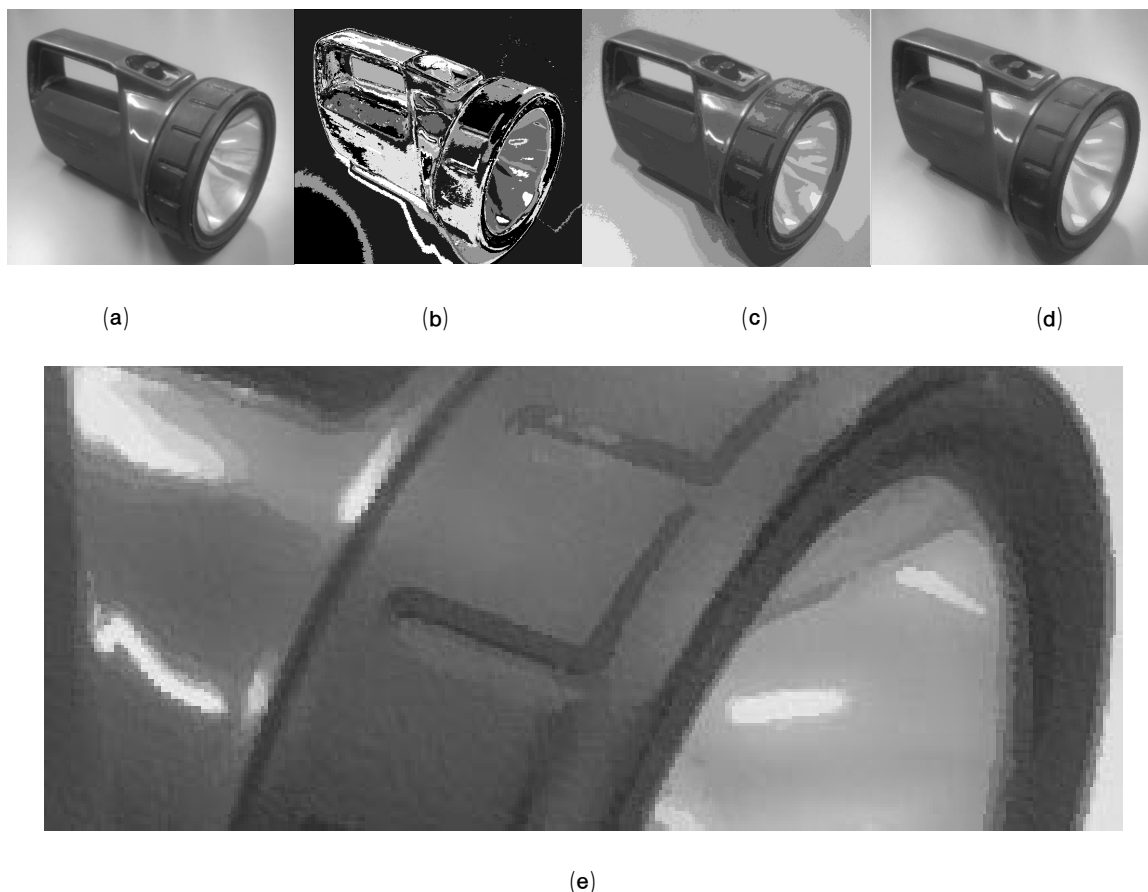


図8 加工例1

自然な色の分布が実現されていることが確認できる。図9には、住宅の写真を加工した例、図10には、そのセピア調表現したものを示す。



図9 加工例2



図10 加工例3

4 おわりに

本研究では、水彩画調パース図を生成する技術開発のために、以下の技術を開発した。

- (1) 既開発のセルオートマトンによる墨の振る舞いのモデルを用いた「点法および皴（しゅん）法の水墨画調レンダリング法」
 - (2) (1)の拡張としての「セルオートマトンによる絵の具の振る舞いのシミュレーション法」
 - (3) カラー画像の領域分割法と(2)を用いた彩色法による「筆画調画像加工法」
- 今後の課題として、以下のようなことがあげられる。
- (1) ポリゴンサイズに依存しない皴法や点法のためのストローク生成法の開発
 - (2) 複数種類の物体が混在しているシーンにおいて、個々の物体の特徴を考慮し、描画法を切り替えるレンダリング法の開発

(3) 画像の領域分割に3次元モデルの情報（生成ストロークなど）を用いる方法

参考文献

- [1] 水墨画への招待, 日本放送出版協会, 1995
- [2] 水墨画テキスト, 日貿出版社, 1992
- [3] 水墨画入門, 梧桐書院, 1993
- [4] 墨絵, 日貿出版社, 1989
- [5] Q.Zhang, S.Yoetsu, J.Takahashi, K.Muraoka and N.Chiba, Simple Cellular-Automaton-based Simulation of Ink Behavior and Its Application to Suibokuga-like 3D Rendering of Trees, The Journal of Visualization and Animation, 1999
- [6] 佐藤, 藤本, 千葉, 絵の具の振る舞いのセルオートマトンモデルとその画像の絵画調加工への応用, 映像情報メディア学会, メディア工学研究会, 2004

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
<i>Suibokuga</i> -like Rendering for Three-Dimensional Geometric Models	Proceedings of NICOGRAPH International 2004, pp.107-112	2004年 5 月
A Watercolor Model for Watercolor-painting-like Rendering	平成15年度電気関係学会東北支部連合大会論文集, p.21	2003年 8 月
絵の具の振る舞いのセルオートマトンモデルとその画像の絵画調加工への応用	映像情報メディア学会メディア工学研究会	2004年 7 月