

ストロークベースの水彩画調レンダリング法

佐藤 陽悦 藤本 忠博 村岡 一信 千葉 則茂
岩手大学工学部

あらまし

近年、コンピュータグラフィクスにおいて非写実的なレンダリング法の研究が活発に行われてきている。筆者らは、これまで、非写実的レンダリングの一手法として、ポリゴンベースの3次元幾何モデルから水墨画調画像を生成するレンダリング手法を提案している。本報告では、この既提案手法をベースとして、3次元幾何モデルから水彩画調画像を生成する手法について提案する。本手法では、紙、筆、および、水と絵の具のモデル化を行う。紙、筆モデル上のセルオートマトンを用いて、水と絵の具の粒子の移動・拡散をシミュレーションすることにより、筆のストロークによる水彩画の特徴的な表現を生み出すことが可能となる。

Watercolor-painting-like Rendering Method Based on Strokes

Yoetsu Sato Tadahiro Fujimoto Kazunobu Muraoka Norishige Chiba
Faculty of Engineering, Iwate University

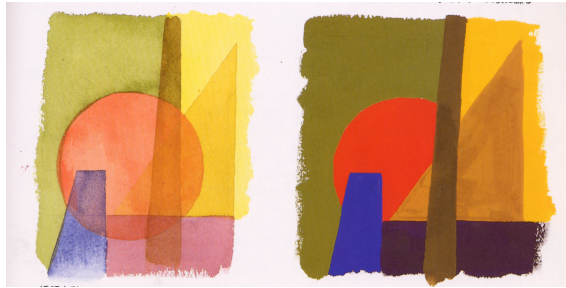
Summary

We propose a method of generating watercolor-style images from three-dimensional polygonal data based on the authors' previously proposed non-photorealistic rendering technique for creating ink painting style images. This style is achieved by modeling the paper, brush, water, and watercolor. The transfer and diffusion of water particles and watercolor particles are simulated using cellular automata on the paper and brush models. This rendering method makes it possible to produce an image that conveys the characteristic impression of a watercolor painting.

1. はじめに

近年、コンピュータグラフィクスにおいて重要な研究テーマとして、ノン・フォトリアスティックレンダリングが多く取り上げられてきている[1]-[11]。これらは、絵画やセルアニメ、テクニカルイラストなど、人の手で描かれたような画像の生成を目的としている。筆者らはこれまでに、ノン・フォトリアスティックレンダリングの一手法として、樹木の骨格モデルやポリゴンによる3次元幾何モデルから水墨画調画像を生成する手法を提案している[9,12]。文献[12]の手法は、ポリゴンベースの幾何モデルから

筆のストローク情報を生成し、セルオートマトンによる筆と紙のモデルに与えることにより、筆から紙への墨と水の粒子の伝播、および紙の内部での墨と水粒子の移動・拡散をシミュレーションすることで、水墨画調の画像を生成するというものである。本報告では、この手法に基づき、墨・水粒子の移動・拡散モデルを絵の具の粒子を考慮したものへと拡張する方法について述べる。また、水彩画の実際の描画手順と水墨画の手法を比較し、ポリゴンベースの幾何モデルから筆のストローク情報を生成し、水彩画調の画像を生成する方法を提案する。



(a)透明水彩 (b)不透明水彩

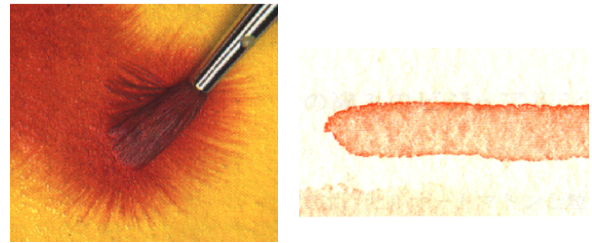
図1：水彩絵の具

2. 水彩画の特徴

ここでは、水彩画調の画像を生成する際に重要となる水彩画の基本的特徴について、文献[13]に基づき、簡単に解説する。

2.1 水彩絵の具

水彩画に用いられる絵の具には、大別して、透明水彩と不透明水彩（ガッシュ）がある。図1に透明水彩と不透明水彩による彩色例を示す。両者とも水で溶いて使う水彩絵の具であり、その成分はほとんど変わらないが、粒子の大きさが異なる。透明水彩は粒子が細かく、紙に塗られたときに下地の色や紙の色が透けて見える。それに対し、不透明水彩は、顔料の粒子が粗く、下の紙や色を覆い隠すのが特徴である。また、彩色に関しても、明から暗の色の段階を作る場合、不透明水彩では白い絵の具を混色することにより色の段階を作るのに対し、透明水彩では水の量を増やすことにより透明度を調整し、色を作る。したがって、ハイライトの部分など“白い”部分は、透明水彩では塗り残して下地の色で表現することが多いのに対し、不透明水彩では白い絵の具を塗ることで表現するなどの表現法の違いが生まれる。また、水をより多く使う透明水彩でよく観測され、表現法としても多く用いられる現象として滲み・ぼかしがある(図2(a))。また、筆跡の周辺部分に絵の具が凝集しその部分の色が濃くなるという興味深い現象も観測される(図2(b))。本研究では、既提案の水墨画調レンダリング法をベースとし、“にじみ”、“ぼかし”といった表現が可能である透明水彩を対



(a)滲み・量し (b)周辺部の凝集

図2：滲み・ぼかし，周辺部の凝集

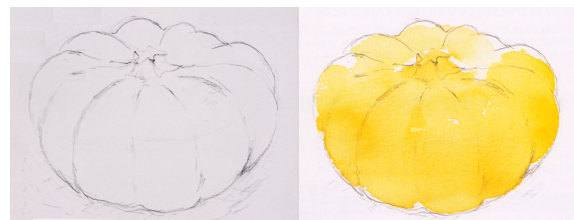
象とする。以後、単に“絵の具”と言った場合には、透明水彩を指すものとする。

2.2 水彩画の描画手順

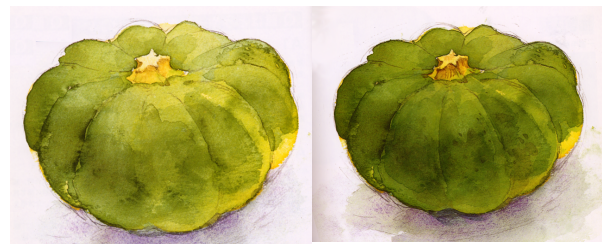
実際に水彩画を描く場合には、以下のような手順に従う。

- 1.描画対象の決定
- 2.鉛筆によるスケッチ(下書き)
- 3.下塗り
- 4.描き込み
- 5.仕上げ

まず、描く対象を決め、鉛筆により下書きをする。そして、その下書きに対し、ベースとなる色を描画対象全体に下塗りする。次に、その下塗りに対して全体的な形や陰影をあらわすための色を塗り込み、最終的にディテールを仕上げとして描き込む。図3に実際に“かぼちゃ”を描いた場合の例を示す。



(a)下書き (b)下塗り



(c)描き込み (d)仕上げ

図3：水彩画の描画手順

本報告では、以上の水彩画の特徴を考慮し、水墨画調レンダリングにおける筆と紙のモデル、水と墨粒子の移動・拡散モデルを水彩画調表現ができるよう拡張する。さらに、上記の描画手順に基づき、ポリゴンベースの3次元幾何モデルから筆のストロークデータを生成し、水彩画調画像を生成する方法について述べる。

3. 水彩画調画像生成法

本手法では、文献[9]で提案されているセルオートマトンによる筆から紙への墨粒子の伝播のモデル、および、紙内部での墨・水粒子の移動・拡散モデルを、絵の具粒子を扱えるように拡張したものをを用いる。このモデルでは、シンプルな2次元のセルオートマトンを用い、絵の具と水の振る舞い、そして、筆から紙への絵の具の伝播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を行うことができる。ここでは、その概要を簡単に説明する。詳細については文献[9]を参照されたい。

3.1 紙と筆のモデル

紙は2次元格子状に配置されたセルがパイプにより接続されたセル・タンクモデルからなる(図4)。絵の具、および、水粒子は、このパイプを通じて、隣接する4近傍のセルへ移動・拡散する。この際、パイプの高さより低い位置の水と絵の具は移動することができない。その量は、そのセルに固有の水と絵の具のキャパシティとみなすことができる。さらに、各セルには基準点からの底の位置が定義されており、底の位置とパイプの高さを調節することにより、移動・拡散に方向性を持たせたり、各セルへの水の留まりやすさなどを調節できる。これらのパラメータをうまく使うことで、毛細管現象による吸水性や保水性、繊維の分布状態の違いによる絵の具のにじみ・かすれの印象の違いといったものを表現できる。

筆のモデルも、紙のモデルと同様に、2次元のセルの配列で毛の集合を表し、絵の具の移動・拡散シミュレーションにおいて接線方向・法線方向の流れを制御することにより、筆内部

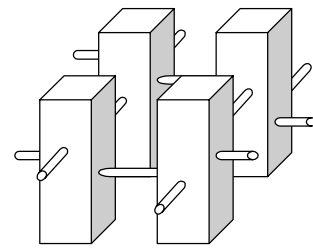


図4：セル・タンクモデル

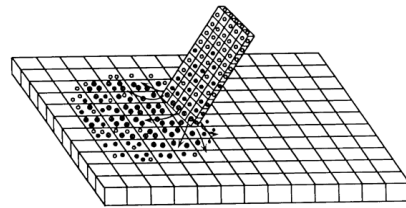


図5：紙と筆のモデル

では筆先端に向かって絵の具が流れやすく、先端のほうに絵の具を含んだ水がたまる傾向があるという性質を表現する。筆内部の絵の具の移動・拡散シミュレーションの後、筆先に溜まった絵の具を紙に伝搬させる(図5)。

3.2 水・絵の具粒子の移動・拡散モデル

水粒子の移動は以下のように表す。まず、セル P_o の水量 W_o は、隣接セルへの流出量と隣

$$W_o := W_o + \sum_{k \in Neighbour} \Delta W_{ko} - \Delta W_{ok}$$

接セルからの流入量より次のように定める。

ここで、 W_{ko} は隣接セルからセル P_o へ流れ込む水量を表し、 W_{ok} はセル P_o から隣接セルへの流出量を表す。

$$W_{ko} = \max\{0, 0.25\alpha \cdot \min\{(B_o + W_o) - (B_k + W_k), (B_o + W_o) - H_{ok}\}\}$$

$$W_{ok} = \max\{0, 0.25\alpha \cdot \min\{(B_k + W_k) - (B_o + W_o), (B_k + W_k) - H_{ko}\}\}$$

ここで、 B_o, B_k は基準点からのセルの高さ、 H_{ko}, H_{ok} は、それぞれ、セル k からセル o への、および、セル o からセル k へのパイプの高さである。

絵の具粒子は、それぞれ、CMY表色系に従うある色 $C(c,m,y)$ を持つものとする。絵の具粒子は水の移動量に比例して移動し、その移動量は次式で表される。

$$I_o := I_o + \sum_{k \in \text{Neighbour}} (\Delta I_{ko} - \Delta I_{ok})$$

ここで、 I_{ko} は隣接セル P_k からセル P_o へ移動する絵の具粒子の量を表し、 I_{ok} はセル P_o から隣接セル P_k への絵の具粒子の移動量を表す。これらは、以下ようになる。

$$\Delta I_{ko} = \Delta W_{ko} (I_k / W_k)$$

$$\Delta I_{ok} = \Delta W_{ok} (I_o / W_o)$$

絵の具は時間が経過すると水分が蒸発して乾燥する。これを以下のように実現する。

$$W_o := W_o - \Delta W$$

W は単位ステップに蒸発する水の量である。紙に移って時間の経過した絵の具は、そのセルに定着し、移動・拡散は行わないものとする。いったん定着した絵の具に関しては、再び水に接触しても移動しないものとする。

3.3 重色(重ね塗り)

水墨画の場合は、墨粒子が塗り重ねられた部分は墨の量にしたがって紙の色が隠され暗くなっていくだけだったが、2章で述べた通り、透明水彩は、塗ったときに下の色が透けて見え、色が交じり合うという特徴をもつ。この特徴を再現するため、乾いた絵の具の上にさらに絵の具が塗り重ねられたときの、セルにおける色 $C(c, m, y)$ を次のように定める。

$$C(c, m, y) = (1 - \alpha) C_{base}(c, m, y) + \alpha C_p(c, m, y)$$

ここで、 C_{base} は絵の具を塗る前のセルの色、 C_p は重ねて塗った絵の具の色、 α はそのセルにおける C_p の量から決定される透明度であり、

$$0 < \alpha < 1$$

とする。

3.4 ストローク

紙と筆のモデルにストロークのデータを与えることにより、水彩画調の画像を生成する。ストロークデータは、各ノードに太さのデータを与えた点列により表現する(図6)。これらの点列を紙と筆のモデルに与えることで、水彩画調の画像を生成する。単純なストロークによる重ね塗りのシミュレーション例を図7に示す。

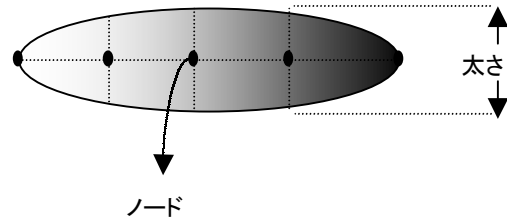


図6: ストローク



図7: 塗り重ねのシミュレーション例

4. ストローク生成手法

3次元幾何モデルの水墨画調レンダリング[12]では、面の凹凸や質感を表現するため、面の傾斜をなぞるように筆を走らせる皴法と呼ばれる描画法を実現可能とした。水彩画の場合にも、面の方向や凹凸を表すため、面に沿って筆を走らせる必要がある。したがって、本手法では、水墨画の皴法のためのストローク生成法を拡張することで水彩画調画像のためのストロークを生成する。

水彩画調画像のためのストロークを生成するためには、まず、対象オブジェクトにレイトレーシング法を適用し、参照画像となる陰影画像を生成する。そして、この陰影画像に対し、画素値の差による領域分割を施す。この際、領域判断のための閾値を大きくとることで、対象オブジェクトが存在する領域と存在しない領域に分割することができる。これを用いて下塗りのストロークを生成する。

すべてのオブジェクトの存在する領域について、その領域の画素値の平均により、色の明るい順にソートする。そして、以下のアルゴリズムをオブジェクトの存在する全領域に適用することにより、幾何モデルから下塗りのためのストロークを抽出する。

Step1. 対象オブジェクトにレイトレーシング法を適用し、奥行き値、輝度値の情報をスクリーンの各ピクセル

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合を、傾斜方向を表すベクトル場と呼ぶことにする。

Step2. 乱数により、領域内にストローク始点の候補点を生成する。

Step3. 各始点の候補点において、その点を開始点として、以下の条件のいずれか1つを満たすまで、傾斜方向を表すベクトル場をトレースする。

[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。

[条件5] ほかのストロークと重なった。

Step4. 生成された点列をストロークとして登録する。

ここで、各ノードにおけるストロークの太さ D は

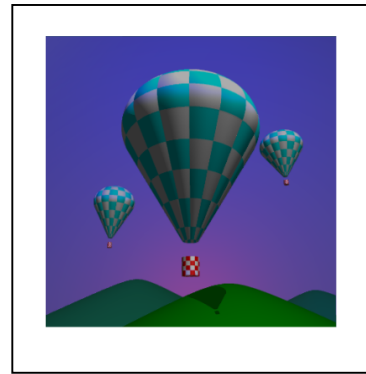
$$D = \sqrt{(1 - (t - a) / a^2) b^2}$$

で表される。 t は始点からノードまでの長さ、 a は領域の大きさから決定される太さの最大値、 b はストロークの全長である。下塗りのストロークをレンダリングする際の絵の具の色は、参照画像の各領域の色の平均値を用いる。

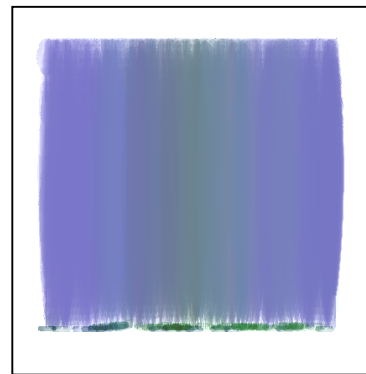
以上と同様の手順を領域分割の際の閾値を小さくとしたものに適用することにより、描き込み、仕上げのストロークを生成する。描き込み、仕上げのストロークでは、レンダリングの際に使う絵の具の色は、参照画像上で、各ストロークが通過した部分の色の平均を用いる。

5. 水彩画調画像の生成

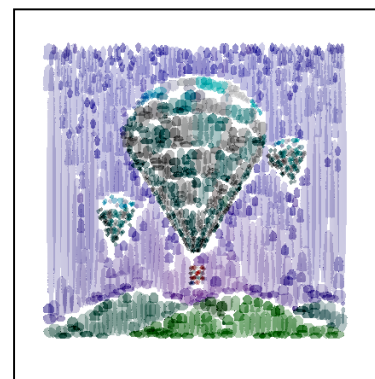
4章の方法で生成されたストロークのデータを3章のモデルに適用することにより、水彩画調の画像を生成する。図8は領域分割と、水彩調



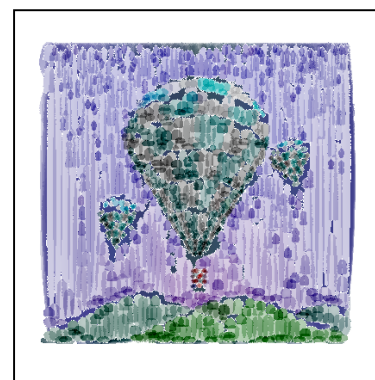
(a) 参照画像



(b) 下塗り

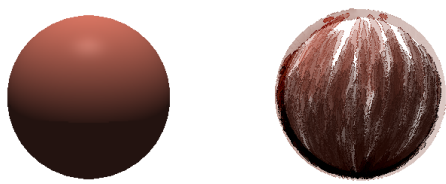


(c) 描き込み、仕上げ



(d) 水彩画調画像

図8：生成画像例



(a)陰影画像 (b)水彩画調画像

図9：球体への適用例

の色彩表現の効果を検証するため、ポリゴンによる正方形の平板にテクスチャを張り付けたものに本手法を適用し、実験を行った例である。(a)はレイトレーシング法により生成された参照画像、(b)は下塗り、(c)は描き込み、仕上げの部分のレンダリング例であり、(d)は(b)と(c)をあわせたものである。図9は球体へ描き込み、仕上げのストロークを適用した例である。

6. まとめと今後の課題

本報告では、3次元幾何モデルの水墨画調レンダリングの手法を拡張することにより水彩画調画像を生成する方法について提案した。今後の課題の一つとして、下書きの実現が挙げられる。水彩画で透明水彩を用いる場合には、鉛筆による下書きが消えない程度に彩色を施していく。本手法では下書きに関しては考慮しなかったが、水彩画を特徴付ける要素として大きな役割を果たすものであり、重要な課題である。また、領域分割による方法だけではディテールが失われてしまうという問題がある。さらに、絵の具の移動・拡散モデルを改良し、実際に観察されるような様々な種類のにじみ、かすれ、また筆跡周辺部の凝集などの現象を再現できるようにすることも、表現力の向上という点において興味深い課題である。にじみの表現に関しては、既発表の絵の具の振る舞いのシミュレーション法

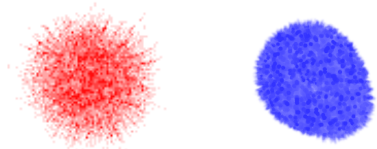


図10：絵の具の振る舞いのシミュレーション例

[14]によるセルオートマトンと粒子法を組み合わせた方法が提案されており(図10)、こちらの方法との統合などを検討している。

参考文献

- [1]大野:フォトリアルでないCG画像表現の手法について, 情報処理学会研究報告, 95-CG-76, pp.1-7, 1995
- [2]Curtis.C et al, Computer-Generated Watercolor, Proc.SIGGRAPH97, pp.401-406, 1997
- [3]高木, 藤代, 中嶋:色鉛筆画周辺技法のポリウムモデリング, 情報処理学会論文誌, pp.616-624, 2000
- [4]D.Small, Simulating watercolor by modeling diffusion, pigment, and paper fibers, SPIE Conference Proceedings, 1460, 140-146, 1991
- [5]Jintae Lee, Simulating Oriental Black-Ink Painting, IEEE Computer Graphics and Applications, pp.74-81, 1999
- [6]Helena T.F.Wong et al, Virtual brush: a model-based synthesis of Chinese calligraphy, Computers & Graphics, pp.99-113, 2000
- [7] 斎藤, 中嶋:インタラクティブペイントツールのための力学的三次元筆モデル, 情報処理学会論文誌, pp.608-615, 2000
- [8]高橋, 張, 村岡, 千葉, セルオートマトンによる墨の振る舞いのシミュレーションとその樹木の水墨画調レンダリングへの応用, 第12回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, p.95-104, 1996
- [9]Qing Zhang et al, 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
- [10]佐藤, 千葉, 村岡, 山岳の水墨画調レンダリング, 情報処理学会研究報告, 99-CG-94, pp.61-66, 1999
- [11]Oliver Deussen et al, Computer Generated Pen-and-ink illustration of trees, Proc.SIGGRAPH 2000, pp.13-18, 2000
- [12] 佐藤, 藤本, 村岡, 千葉, ポリゴンベース幾何モデルの水墨画調レンダリング, 2001-CG-103, pp.37-42, 2001
- [13]水彩初級 LESSON, 視覚デザイン研究所, 1989
- [14]東山, 絵の具の振る舞いのシミュレーション法に関する研究, 岩手大学修士論文