

水墨画調映像を生成する3次元CG

高橋淳也⁺, 張青⁺⁺, 村岡一信⁺⁺⁺, 千葉則茂⁺
+岩手大学, ++明生システム株式会社, +++盛岡短期大学

アブストラクト

水墨画は、墨と筆の複雑な現象である濃淡、にじみおよびかすれを用いて描かれる味わい深い伝統的絵画である。

本文では、水墨画調レンダリングのための2次元セルオートマトンに基づいた水および墨粒子の振る舞いのモデルを提案する。さらに、そのモデルの応用として、木の3次元モデルから水墨画調の画像を生成するノンフォトリアリスティックレンダリング法を提案する。

A Three Dimensional Computer Graphic Technique for Generating *Suibokuga*-like Images

Jun-ya TAKAHASHI⁺, Qing ZHANG⁺⁺,
Kazunobu MURAOKA⁺⁺⁺, Norishige CHIBA⁺
+Iwate University, ++Meisei system Co., +++Morioka Junior College

ABSTRACT

Suibokuga is monochrome painting, characterized by the use of Chinese black ink (called *sumi*), and is painted by utilizing complex interactive phenomena between brush, ink and paper. *Noutan* (shade), *Kasure* (scratchiness) and *Nijimi* (blur) are notable visual features of the phenomena.

In this paper, we will present a behavioral model of water and ink-particles based on a 2D *cellular-automaton* computational model and its application to *Suibokuga*-like rendering of 3D trees.

1. はじめに

本研究の目的は、3次元CGの枠組みの中で、水墨画調の画像(山水画)を生成するCG技法の確立である。

これまでのレンダリング技法は、いわゆるフォトリアリスティックな表現を目的に光の物理シミュレーション法という立場で開発され、多くの成果をあげてきている。一方、“非写實的”な表現法に関する研究も最近活発になってきている。この中には、3次元CGの枠組みの中でより理解しやすい画像を生成しようというもの[Sai90, 神原92, 島田94, Win94]や絵画調の画像を生成しようというものが含まれる。この後者の絵画調の表現には、これまで2次元CGや画像処理手法によるものが多く[Str86, Hae90, Nis93, 齊藤95], 3次元CGの枠組みの中でおこなった例は少ない。

本研究は、3次元CGとして対象物体の幾何モデルから水墨画調の画像を生成するレンダリング法の開発を試みるものである。水墨画に関連する研究例としては、これまでフォント作成を目的としたもの[張憲86, 張憲93, 石亀94]や、2次元CGのための筆の開発を行ったもの[西田92, 張家93]などがある。ただし、墨の筆や紙の中での振る舞いをシミュレーションした例は少なく[Guo91], 多くは現象面からのシミュレーションによるものである。

本論文では、筆と紙の物理的な特性を考慮しながら、筆と紙の中で墨の移動・拡散をシミュレーションするためのモデルと筆と紙のモデルを提案し、さらに樹木を例として、水墨画調のレンダリングアルゴリズムを提案する。

2. 墨, 紙および筆のモデル

紙と筆は共に隣接するノード同士を“パイプ”でつないだ2次元配列すなわち、セルオートマトンを用いてモデル化される(図1)。

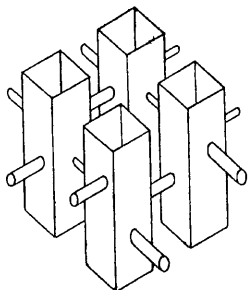


図1. 2次元セルタンクモデル

2.1 墨

我々は、墨の基本的な移動・拡散のモデルを2次元のセルオートマトンで以下のように定義する。

セル P_{ij} の状態変数 (W_{ij}, I_{ij}):

W_{ij} はセル P_{ij} に存在する水の量 (すなわち仮想的な“水粒子”の個数) であり, I_{ij} はセル P_{ij} に存在する水に含まれている“墨粒子”の個数である。

隣接セル

各セル P_{ij} はその4近傍のセル $P_{i,j-1}, P_{i,j+1}, P_{i+1,j}$ および $P_{i-1,j}$ と隣接している。簡単のためにセル P_{ij} の添字 (i, j) を o と書き, セル P_o に隣接する4つのセル $P_{i,j-1}, P_{i,j+1}, P_{i+1,j}$ および $P_{i-1,j}$ を隣接セルと書く。

状態遷移

状態遷移は、局所的な関数 f で定義される:

$$S_o(t + \delta t) := f(S_o(t), S_k(t) | k \in \text{隣接セル})$$

ここで, $S_o(t)$ は時刻 t でのセル P_o の状態, すなわち

$$S_o(t) = (W_o(t), I_o(t))$$

である。局所的な遷移関数 f は以下の処理を1タイムステップ毎に一定回数繰り返すことによってインプリメントしている。

局所的遷移関数 f

水粒子の移動

セル P_o の水量 W_o は, 隣接セルから流れ込む量と隣接セルへ流れ出す量より以下のように求まる。

$$W_o := \Sigma(\Delta W_{k_o} - \Delta W_{o_k})$$

ここで, ΔW_{k_o} は隣接セルからセル P_o に流れ込む水量を表し, ΔW_{o_k} はセル P_o から隣接セル P_k へ流れ出す水量を表す。

ΔW_{k_o} および ΔW_{o_k} は以下のように定める。

$$\Delta W_{k_o} := \max\{0, \min\{\alpha((B_k + W_k) - (B_o - W_o)), 0.25 \times ((B_k + W_k) - H_p)\}\}$$

$$\Delta W_{o_k} := \max\{0, \min\{\alpha((B_o + W_o) - (B_k - W_k)), 0.25 \times ((B_o + W_o) - H_p)\}\}$$

$$H_p = \max\{B_o + C_{min_o}, B_k + C_{min_k}\}$$

ここで, B_o, B_k は基準点から各セルの底の高さ, α は水の移動係数, H_p はパイプの高さ, C_{min_o}, C_{min_k} はそれぞれのセルに対して定義される水の容量で保水量と定義する。

水の移動量は, 水位差 $((B_o + W_o) - (B_k + W_k))$, 移動係数 α , およびパイプの高さ H_p に影響される。これらのパラメータにより, 単位時間での水の移動量を調整できる(図2参照)。

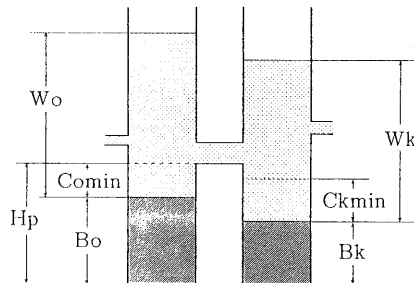


図2. 墨の移動・拡散モデル

墨粒子の拡散

墨粒子は、水量の移動量に比例して移動する。各セルの墨の量 I_o は、次のように計算する。

$$I_o := I_o + \Sigma(\Delta I_{k_o} - \Delta I_{o_k})$$

ΔI_{k_o} は隣接セル k からセル P_o に流れ込む墨粒子の量で、 ΔI_{o_k} はセル P_o から隣接セル P_k へ流れ出す墨粒子の量である。 I_o および I_k を、移動する前にそれぞれのセルにある墨の量とすると、 ΔI_{k_o} および ΔI_{o_k} は次のように求められる。

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

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

墨の粒子が移動した後、セルの中の濃度平衡がくずれが、時間の経過とともに、新たな平衡状態に向かう傾向がある。

そのため、セルの中の濃度平衡を以下のように、一定の回数で計算する。

$$I_o := I_o + \Sigma I_{d_k o}$$

$$\begin{aligned} \Delta I_{d_k o} &= \beta(I_k - W_k(I_o + I_k))/(W_o + W_k) \\ &= \beta(I_k W_o - I_o W_k)/(W_o + W_k) \end{aligned}$$

ここで、 β は定められた拡散係数である。

水を保有していないセルへの墨粒子の拡散は行わないものとする。また、セルに定着した(乾いた)墨について、墨粒子の移動・拡散も行わない。しかし、墨が乾く前に水分が補充されると、墨粒子の移動・拡散が行われることも考慮する。

水分の蒸発

紙に移った墨は時間がたつと水分が蒸発する。これを実現するため、次の計算を行う。

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

ここで、 ΔW は単位ステップに蒸発する水の量である。水分の蒸発によって水がなくなると墨は乾燥し、紙の上に定着する。さらに一定の時間が経過すると、いったん定着した墨が再び水に接しても移動しないものとする。

2.2 紙のモデル

紙は繊維の間に毛細管現象により吸水性や保水性をもつ、墨が紙の上に落ちたとき、水が墨を周辺へ運んでいく。墨粒子は水粒子より大きく、重く、繊維の間に形成された空間に溜まりやすい。また、毛細管現象により、水は繊維方向へ流れやすい。繊維の密度(分布状態)により、紙の吸水性や保水性が異なるために、墨のにじみやかすれの印象には紙の繊維の分布が大きく効いてくる [Guo91]。

これを実現するためには、紙のモデルには繊維の方向性、吸水性、および保水性の表現が必要である。本文ではこれらの性質を考慮した紙のモデルを以下のように提案する。

Step 0: 紙のモデルは、2次元のセルオートマトンで構成する。(前述の移動・拡散モデル)

Step 1: B_o , C_{min_o} で紙の厚さを表し、 C_{min_o} は紙の保水能力を表す。

Step 2: 紙の粗さは繊維の数で表し、繊維の数が多くなると細密な紙であり、少なくなると粗い紙となる。

Step 2-1: 2次元配列上に、一定の長さを持つ線分を乱数により分布させ、これらの線分を紙の繊維と仮定する。

Step 2-2: 各線分が通過したセルで、次の計算を行う。

$$(B_o, C_{min_o}) := (B_o - \Delta B, C_{min_o} - \Delta C)$$

ΔB はセルの底の高さであり、 ΔC は各繊維の最小保水量である。

以上のモデル化により、繊維方向に墨が流れやすく、繊維の多いところでたくさんの墨を蓄えることができるという性質が実現できる。さらに、この紙のモデルに対して前述の水および墨の移動・拡散をシミュレートし、墨のにじみ現象を表現する。

紙の質感の表現は、繊維のにじみやすい紙の場合は繊維の数を増やし、保水量を小さくする。一方、粗っぽいにじみにくい紙の場合には、繊維の数を減らし、保水量を大きくすればよい。図3に繊維の様子を示す。

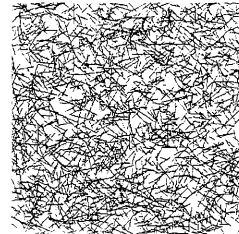


図3. 繊維の表現

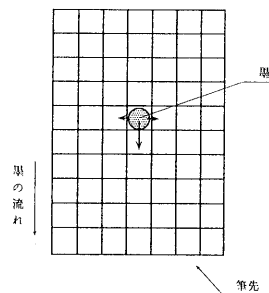


図4. 筆のモデル

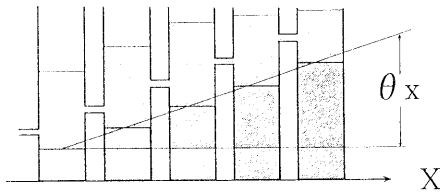


図5. セルの高さの概念図

2.3 筆のモデル

筆のモデルとしては、直接的に現象（墨跡）を表現する方法 [Hae90, Nis93, 張 93, 石亀 94] と、筆と墨の振る舞いからシミュレーションする方法が考えられる。本研究では、にじみやかすれなどの表現のために、後者のタイプのモデルを開発することを目指している。

図4に示すように、筆のモデルは紙のモデルと同様に2次元のセルの配列で剛毛の集合を表現し、墨の移動・拡散のシミュレーションでは、接線方向と法線方向の流れを制御することが必要である。

さらに、筆の表現のためには、筆先端に向かって墨が流れやすく、先端の方に溜まるようにする必要がある。そのためには図5のように筆の先端に向かってパイプが低く小さくなるように、セルの底の高さを調節する。筆は、繊維が平行に分布した紙と同様にモデル化する。また、筆は筆圧が変わると墨跡の幅が変化する。これを実現するために、筆圧により紙と接触するセルの数を制御し墨跡の幅を変える。

筆圧と墨跡の関係は、

$$B_w = \gamma(1 - \exp\{-P\})$$

とする。ここで、 P は筆圧、 B_w は墨跡の幅、 γ は筆圧に関する係数である。(図6参照)

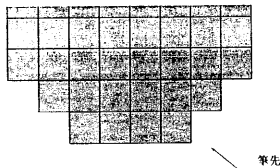
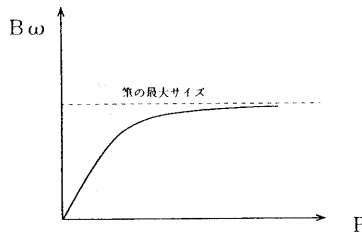


図6. 筆圧と墨跡

筆圧が大きくなると紙と接触するセルの数は多くなり、墨跡は太くなる。逆の場合は墨跡は細くなる。

筆圧が一定の限度を越えると剛毛が分割されることもあるが、この現象の実現は、濁筆の表現に重要となる。

筆圧 P は対象物の大きさ D 、すなわち、木の枝の太さに関連して以下のように定める。

$$P = D^{1.5}$$

ストロークの長さや表現対象により、筆の速度は変化する。速度が大きくなると単位時間に筆から紙へ移る墨の量は少なくなり、墨はあまりにじまなくなる。さらに、筆先への墨の補充が追いつかないと、かすれ現象が現れる。

ここでは、筆速を次のように定める。

$$n(x) = n_{max} - \varepsilon L \{1 - ((x - L/2)/(L/2))^2\}^2$$

$$0 \leq x \leq L$$

ただし、 L はストロークの長さ、 x は筆の位置、 $n(x)$ は筆が単位ステップ移動するときの筆内部の墨の移動・拡散の回数である。回数が多い場合筆速は遅く、回数が少ない場合筆速が速い。また、式中の ε は係数で、 n_{max} は筆内部での移動・拡散の最大回数である(図7参照)。

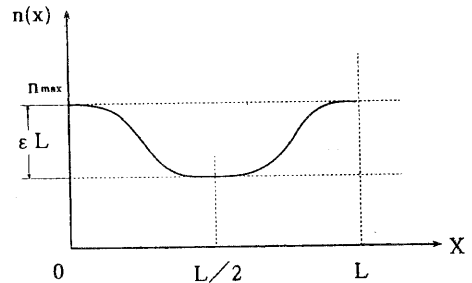


図7. 筆速

筆内部の墨の移動・拡散の計算は、前述した移動・拡散モデルを用いて次の手順で行う。

Step 0: 筆を2次元のセルオートマトンで構成する。
Step 1: B_0, C_{min0} で筆の厚さを表し、 C_{min0} は保水能力を表す。

Step 2: 墨の流れは、筆先に流れやすいようにセルの底の高さを以下のように設定する。ただし、 θ は定数であり、 x はセルの座標である。筆先の座標を0とする。

$$B_0 := B_0 + \theta x \quad x \geq 0$$

Step 3: 筆の中で繊維の分布状態は均一ではないため、2次元の1/fノイズ F_0 を筆のセルの底の高さに加える。

$$B_0 := B_0 - F_0$$

Step 4: 剛毛の中で、墨の移動・拡散シミュレーションを行う(これは紙のモデルでの繊維効果のシミュレーションと同じである)。

Step 4-1: 筆の中で剛毛と平行して、一定の長さの2次元の線分をランダムに発生させる。

Step 4-2: 発生した線分が通過したセルに対して、次の修正を行う。

$$(B_o, C_{min_o}) := (B_o - \Delta B, C_{min_o} + \Delta C)$$

ここで、 ΔB はセルの底の高さに関する定数であり、 ΔC は保水量の定数である。

以上の計算の後筆先に溜まっていた墨を紙に伝搬させる。その後、次のステップの計算を始める。

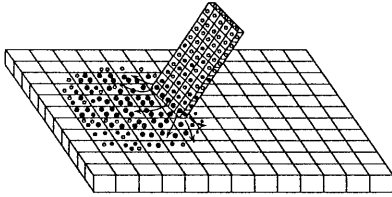


図8. 墨跡の生成

2.4 墨跡のシミュレーション例

図8に示すように、まず筆のモデルと紙のモデルを接触させ、接触部において筆内部の墨の移動・拡散を適当な回数繰り返した後、墨を筆から紙へ移す。次に、接触位置を変更して以上の計算を繰り返し、順次に紙の上に墨を落とす。また、紙に移した墨に対して、一定の回数で墨の移動・拡散を計算してにじみの現象をシミュレーションする。これで、筆跡（墨跡）が形成される。

次に、筆から紙への墨の移動・拡散シミュレーションを行った例を示す。

図9は、生成した基本的な筆跡である。

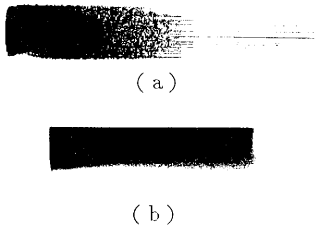


図9. 墨跡のシミュレーション例

(a)は直筆の表現である。(b)は濃淡変化がある表現であり、側筆で描かれたものと同様の効果が得られている。図10は筆の速度が大きく、かすれの現象が生じた例である。



図10. かすれのシミュレーション例

図11は筆跡を重ねて描くときの先に描かれた筆跡の状態によるにじみ現象の差異を示している。(a)は、先に描かれた筆跡の墨はすでに乾いている場合で、後で描かれた筆跡は先の筆跡に影響されていない(つまり、にじまない)。(b)では、先に描かれた筆跡の墨はまだ乾いていないため、あとで描かれた筆跡と互いに影響しあい、筆跡がにじんでしまっている。

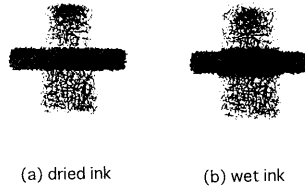


図11. 墨跡の重なりによるにじみの例

3. 樹木の水墨画調レンダリング

本研究では、樹木の水墨画を描くために、著者らの一部が開発した樹木の成長シミュレーション(図12)により得られる3次元骨格データを用いている。骨格データからストロークを生成し、生成したストロークの前後関係により、隠れた部分を取り除き新たにストロークを生成し、これらのストロークを用いて、前述の筆と紙のモデルで水墨画調の画像を生成する。

3.1 樹木の骨格形状データからのストロークの生成

樹木の生長シミュレーションの出力として、枝の端点の3次元座標、親枝から子枝への分枝角および太さの情報が得られる。これらのパラメータを用いて、筆で描くためのストロークへの分解・分割が必要になる。この処理は、以下のように行っている。

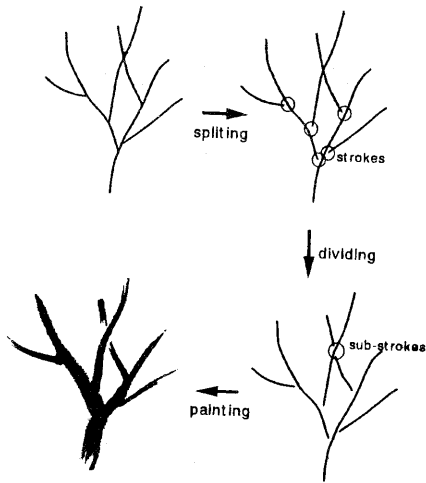


図12. ストロークの生成

Step 1: 枝が存在する限り以下の処理を行う。
Step 2: 根元から先端に向かって太い方の子枝をたどっていく。ただし、太さが同じ場合は手前にある枝を優先する。また、方向距離が同じ場合には親枝の方向ベクトルにより近いベクトルを持つ子枝を優先する。
Step 3: Step2の方法で先端までたどり終えるか、また、たどった枝の列をスクリーンに平行投影したとき、現在の先端の枝とその子枝の角度が定められたしきい値以上の角度をなすならば、現在までたどった枝の列を1つのストロークとして登録し骨格データより削除する。

生成したストロークは、3次元の位置情報を持つため、各ストロークの前後関係がわかるようになっている(図13参照)。

3.2 隠れ枝の処理

画家が絵を描くとき、見えない部分について省略したりすることが一般的である。見えない部分については簡易Zバッファおよび仮想スクリーンを用いて以下のような処理を行う。

Step 1: 前述した処理で生成したストロークを、スクリーンから遠い順に1~nの番号をつける。これをZ値とする。
Step 2: 前述した処理で生成したストロークの始点の直径(枝の根元の太さ)をソートして、最も太いストロークから順に1~nの番号を付ける。
Step 3: いちばん遠いストロークからスクリーンにストローク番号を書き込む。他のストロークを横切る場合は、ストローク番号を現在の番号に書き換える。

Step 4: 上記と同じ順番にストロークをたどっていく。自分の太さ番号より小さなストローク(自分より太いストローク)が横切っていた場合、そこでストロークを分割する。分割点の座標と太さを新たなストロークの始点の情報とする。自分の太さ番号より大きなストローク(自分より細いストローク)が横切っていた場合には、何もしない(図13参照)。

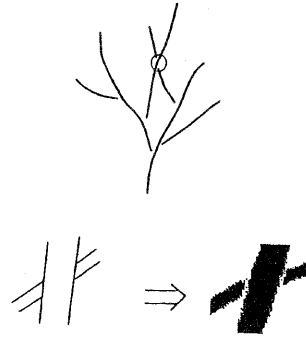


図13. 隠れ枝の処理

以上の処理でストロークの生成、分割を行い、樹木の水墨画調レンダリングを行う。

3.3 樹木の水墨画調レンダリングの例

樹木を描くとき、ストロークの情報により、筆のサイズ、墨の濃淡、筆圧、筆速等を定める。筆速は前出の定義式を樹木の各ストロークの長さLに応じて定める。筆圧は、筆の速度に反比例するものとして定める。筆のサイズはストロークの太さより定め、墨跡の変化は筆圧で制御する。墨の量は、描く枝の面積に比例させ、墨の濃淡については太いストロークは濃く、細いストロークは薄いとす。また、前後関係を考慮し、前面のストロークを濃く設定し、後面のストロークを薄く設定する。

図14は以上の手順で生成した樹木の水墨画調の画像である。左側に対応する生長モデルの写実的画像を示す。さらに、下段は上段右に対して、水と墨のパラメータを変えてレンダリングした例である。

図15は、図14に示した幾何モデルを回転させてレンダリングを行った例である。それぞれのレンダリング時間はHP9000/715を用いて約3時間を要した。

5. むすび

本論文では、まず水墨画調の画像生成に必要なとされるシミュレーションすべき現象をまとめた。シミュレーションすべき現象である墨のにじみやかすれなどを実現するための墨の移動・拡散モデルを開発し、筆と紙のモデルを提案した。さらに、このモデルの応用例として、樹木の水墨画調レンダリングアルゴリズムを提案した。

今後の課題として、筆と紙のモデルの表現能力向

上のためのモデルの改善, および幾何モデルを樹木に限らない対象物へと適用範囲を広げることが挙げられる.

[関 92]
[伊藤 93]

Proc. of SIGGRAPH 94, pp. 91-100, 1994
関, 水墨画テキスト, 日貿出版社, 1992
伊藤, 水墨画入門, 梧桐書院, 1993

参考文献

- [石亀 94] 石亀昌明, 三浦望, 松尾広, 筆のモデルによる毛筆文字生成アルゴリズム検討, 平成6年度第3回情報処理学会東北支部研究集会資料, 94-3-16, 1994
- [神原 92] 神原章, 近藤邦彦, 佐藤尚, 島田静雄, 3次元形状表現のための高品位白黒画像の描画法, 情報処理学会研究報告・グラフィックスとCAD, 56-3, pp. 11-16, 1992
- [斉藤 95] 斉藤豪, 中嶋正之, FFTを用いた写真からの手書き風画像の自動生成, 情報処理学会研究会報告・グラフィックスとCAD, 74-3, pp. 11-16, 1995
- [島田 94] 島田繁広, 近藤邦雄, 佐藤尚, 神原章, ドットラインシェーディングによる白黒画像のための強調描画手法, 情報処理学会グラフィックスとCADシンポジウム論文集, pp. 41-47, 1994
- [張家 93] 張家均, 大野義夫, スケルトン方式による墨跡の表現に関する研究, 情報処理学会研究報告・グラフィックスとCAD, 61-1, pp. 1-8, 1995
- [張憲 86] 張憲榮, 李華妹, 真田英彦, 手塚慶一, 自動連筆の可能な毛筆書き平仮名の生成, 電子通信学会論文誌, Vol. J 76-D-II, 9, pp. 1868-1877, 1993
- [西田 92] 西田友是, 田北普一, 中前栄八郎, Bezier関数を用いた墨絵の表現, 情報処理学会・グラフィックスとCADシンポジウム'92論文集, pp. 153-160, 1992
- [Hae90] P. Haeberli, Paint by Numbers: Abstract Image Representations, Vol. 24, No. 41990
- [Guo91] Q. Guo and T. L. Kunii, Modeling Diffuse Painting of 'Nijimi', Proc. of the IFIP, WG 5.10 Working Conference Tokyo Japan, pp. 329-338, 1991
- [Nis93] T. Nishita, A Display Algorithm of Brush Strokes Using Bezier Functions, Communicating with Virtual Worlds, pp. 244-257, 1993
- [Sai90] T. Saito and T. Takahashi, Comprehensible Rendering of 3-D Shapes, Computer Graphics Proc. of SIGGRAPH 90, pp. 197-206, 1990
- [Str86] S. Strassman, Hairly Brushes Computer Graphics, Vol. 20, No. 4, 1986
- [Win94] G. Winkenbach and D. H. Salesin, Computer-Generated Pen-and-Ink Illustration, Computer Graphics

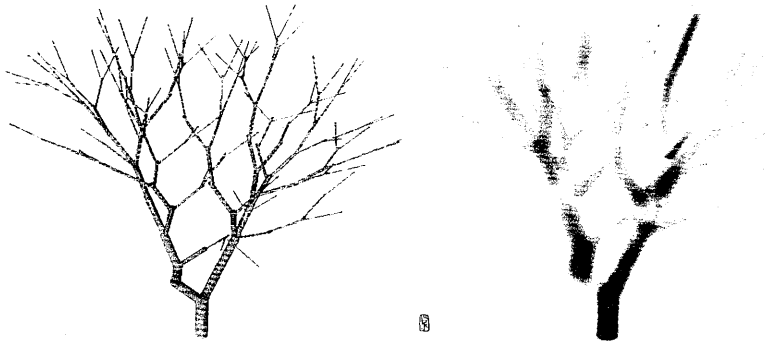


図14. 幾何モデルとその水墨画調レンダリング例



図15. 樹木の水墨画調レンダリング例