

# インタラクティブペイントツールのための 筆モデル

齋藤 豪 中嶋 正之

東京工業大学 情報理工学研究科

従来のペイントツールでは円盤を筆の接地面とするストロークか、もしくはエアブラシのような効果を生みさせるストロークがほとんどであり、実際の筆のような表現力の高いストロークを描画することができていない。ストロークの表現力を高めようとする研究も行われているが、実際の筆での描画と比較した場合、それらストロークの制御法は、実際の筆の操作と異なり、不自由さが存在する。そこで、本稿では、タブレット型ポインティングデバイスを入力として、実際の筆と同様な操作により、表現力の高いストローク入力の可能な筆の物理モデルの提案を行う。

## A paint brush model for interactive painting tools

Suguru SAITO Masayuki NAKAJIMA

Graduate School of Information Science & Engineering,  
Tokyo Institute of Technology

Strokes drawn by current paint tools' brushes are almost based on disc tracks or an air brush. These have a limit their expression comparing with real brushes in the world which can draw subtly and variously. There are studies to develop the expression. However their stroke controlling methods are not same as in the real world and are not easy. This paper describes a novel three dimensional physics based brush model which is controllable intuitively by natural operations with pen tablet device and which allows high expressive strokes.

## 1 はじめに

描画作業を計算機上で行う利点は様々ある。他のデジタル画像素材との色合わせが容易、描画におけるやり直しが可能、通常の描画物をデジタル化するためには必要となるデジタル化が不要、完全な劣化の防止、ストロークデータが記録可能という点である。

しかしながら、現在のペイントツールには、本物の画材を用いた場合と比較して、描画表現の自由度に制約があると考えられる。本物の画材には、様々な種類、組合せによる異なった描画が可能であるという自由度がある。そこで計算機上での画材に関するモデリングに関する研究が行われている [1][2][3][4]。我々は個々のストロークに関して、画家の個性が表現可能なほどの入力手段が用意されていないのではないかと考え、ストローク入力法に着目した [14]。

ストロークを描くための道具として筆に焦点をあてると、“点”、“はね”、“払い”といった、書きはじめ、書き終わりに対して変化を与えることが可能である。図1は漢字の筆法に関する文献からの引用である。筆の表現法の多様性を表している。加えて、絵の描画例では筆圧の弛緩、筆速の変化による多様な変化を与えることにより多様な線の描画が行える。本稿では、多様に变化するストロークを物理シミュレーションを伴った三次元筆モデルにより再現可能とする。さらに提案モデルの制御にはペンタブレットデバイスから得る、筆圧、位置、筆の傾斜のデータを用い、従来の計算機上での描画手法では得ることの難しかったストローク描画を直観的に入力可能としている。



図1: 永字八法と呼ばれる漢字の基本的な筆使い

## 2 ストローク表現への従来の取り組み

従来の商用ペイントツールの多くでは、円盤を筆の接地面とするストロークか、それをやや複雑にした円盤内の着色に濃淡やランダム性を与えてエアブラシのような効果を生じさせるストロークがほとんどである [5][6][7]。この手法は計算処理が容易であるため実用化には適していると言えるが、その半面、先程述べた多様なストローク表現の能力には限界があると言える。

よりリアルな絵の具の特性の再現を試みたものの、水っぽいものから粘性のある物質まで様々な特徴を持つ絵の具のモデル化をセルオートマトンを用いて行い、実際の画材の特性に似せた描画を可能とした研究 [1] や、水彩や水墨画での滲みまで再現した研究 [2][8] がある。しかしながら、対話的な入力という観点からは、これらは処理が重たいため、ストローク入力時には仮描画しか行われず、本描画は後処理で行われる。

ストロークの表現力を高めるためにテキストチャを用いた研究 [9] も存在するが、本当の筆による描画のような操作に対する直接的な筆跡を得ることは出来ない。

対話的な入力を考慮したかすれの雰囲気を出すストローク表現を再現しようとした研究 [10] やそのフォントへの応用の研究 [11] もあるが、本当の筆の入力とは異なったマウスオペレーションとなっている。また、筆の柄の軌跡が常に筆跡の中心にあるため、得られるストロークの表現の自由度に制約がある。

毛を弾性体としてモデル化し、筆の房の三次元形状をシミュレートして、ストローク描画を行う手法の提案 [12] も行われているが、房の接地面が零状ではなく、線分となっているため、残念ながら図1における“点”のような止めの表現などの毛の房の接地形状に依存した描画表現は難しいと考えられる。弾性体としてモデル化し、毛の接地点が先端から移動した場合になってしまう状況を考慮したすれば、毛の房の接地形状の自由度が上がるが、シミュレーションはより複雑になると予想される。

我々が提案する筆の物理モデルでは、より単純に毛の房を棒、関節、及び、質点で表す。これにより負荷の軽い計算で、毛の房の先端の軌跡が筆の柄の軌跡とずれて描かれることによる微妙なストロークを再現する。物理モデルについては第3.1節において詳しく述べる。また、毛の房の全体の形状は房の柄への付け根、房の先端、柄の軸の延長線上の点の3点を制御点とする Bezier 曲線であらわされる曲線を背骨曲線 (spine curve) とする房形で表現する。房型の形状と画材との接地面を計算することにより、零形の接地面を計算でき、ストロークの“止め”や切替えしの部分での表現を可能とする。毛の房の形状、接地

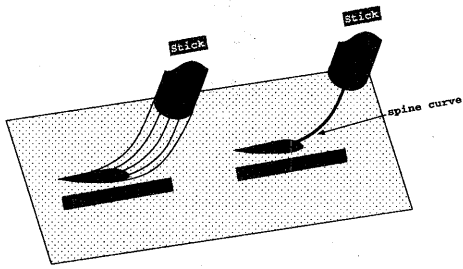


図 2: 筆の毛のモデリング

面の計算については第 3.2 節において詳しく述べる。さらに、筆の房と画材との液体移動に関するアルゴリズムを実装し、ストローク内の微妙な濃淡の表現を可能とする。この点については 3.3 で述べる。

### 3 三次元筆モデル

本章では提案する筆モデルを物理モデル、房形状計算、液体移動アルゴリズムの順に述べる。

#### 3.1 物理モデル

毛を一本ずつモデル化し、それらの状態のシミュレーションを行うのは、重い負荷が予想される。今回は画材との接地面を求めることが、一番重要であることから図 2 に示すように筆の房の形状を毛の背骨曲線で代表させることにする。筆の背骨曲線のための物理モデルには、直線部と関節部からなるモデルを考える。その構造は次のとおりとする。

1. 直線部の長さは変化しない
2. 関節部は 2 自由度を持ち、曲げ角に正比例して直線に復元しようとする力が働く
3. 関節部及び先端部は質量を持つが、直線部は質量を持たない

次に、背骨線の系全体のエネルギーの計算式を検討する。まず始めに、背骨線の各部と変数、定数の対応付けを図 3 で行う。

$m_n$  は質量、 $l_n$  は長さ、 $v_n$  は位置座標、 $\theta_{bn}$  は曲げ角を表す。 $\theta_{xn}$ 、 $\theta_{yn}$  は背骨線の姿勢を表す回転角であり、 $v_n$ 、 $\theta_{bn}$  は  $\theta_{xk}$ 、 $\theta_{yk}$  ( $k = 0 \sim n$ ) 及び柄の付け根の座標、傾きから二次的に求められる。

[位置エネルギー]

座標  $v_n$  にある各関節部及び、先端部の質量  $m_n$  が持つ位置エネルギー  $E_{pn}$  を次のとおりとす

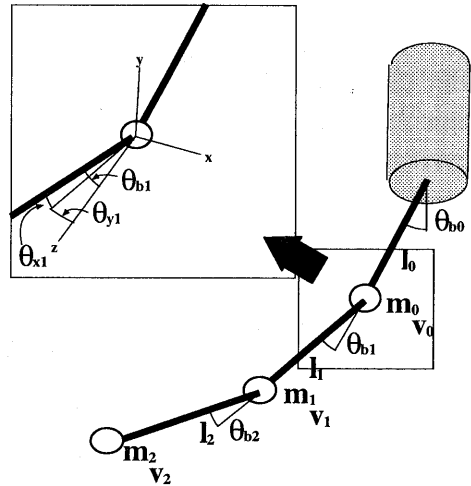


図 3: 背骨線の各部と変数、定数の対応付け

る。ここで、 $g$  は重力加速度である。

$$E_{pn} = m_n g v_{nz} \quad (1)$$

[運動エネルギー]

各関節部及び、先端部の質量  $m_n$  が速度  $s_n$  の時の運動エネルギー  $E_{kn}$  を次のとおりとする。

$$E_{kn} = \frac{1}{2} m_n s_n^2 \quad (2)$$

[曲げエネルギー]

各関節部における、曲げにより蓄えられるエネルギー  $E_{bn}$  は曲げ角を  $\theta_{bn}$  とした時の抗力が  $K_{bn} \theta_{bn}$  であることから式 (3) で表される。

$$\begin{aligned} E_{bn} &= \int K_{bn} \theta_{bn} d\theta_{bn} \quad (3) \\ &= \frac{1}{2} K_{bn} \theta_{bn}^2 \end{aligned}$$

[摩擦による仕事]

シミュレーションを行う際には、時間を離散化するが、もしも、 $m_n$  が画材と接触している場合には前の時刻から現在の時刻までの移動距離に応じた仕事が生じるものとする。ここでは、画材との垂直抗力を単純に  $m_n g$ 、摩擦係数を  $\mu$ 、水平移動距離を前の時刻と現在の時刻の位置  $v_{nt-1} v_{nt}$  から、 $disxy(v_{nt-1}, v_{nt})$  として摩擦による仕事を式 (4) であらわす。

$$E_{fn} = \mu m_n g disxy(v_{nt-1}, v_{nt}) \quad (4)$$

以上から背骨線の系全体のエネルギー  $E$  は式 (5) となる。

$$E = \sum_n E_{pn} + E_{pn} + E_{kn} + E_{fn} \quad (5)$$



図 4: 節数 1 で  $\sin$  曲線を描画した際の結果

ここで、背骨線の姿勢をシミュレートする問題は、 $E$  の最小値を取るパラメータを求めることに等しい。即ち、系の外部から背骨線の付け根である柄の下端の座標  $x, y, z$ 、及び、柄の傾き  $tiltx, tilty$  が与えられたとき、それらを定数として式 (5) の  $E$  が最小値となるような  $\theta_{xk}, \theta_{yk}$  ( $0 \leq k \leq n$ ) を求めれば良いことになる。最小値を求めるために、ここでは Newton-Raphson 法を用いる。

節の数が多し程、モデルとしては厳密である。しかしシミュレーションの計算量は増大する。そこで、毛先の軌跡が、柄の軸の軌跡に対してどのように追従するかを予備実験により調べた。その結果から節数が 1 の場合でも、望んだような毛先の軌跡を得られることがわかった。図 4 がその結果である。薄い  $\sin$  カーブを描く線が柄の軌跡であり、それに対して毛先の軌跡を表す濃い線が遅れを伴って追従していることがわかる。よって、節数は 1 とする。

### 3.2 房形状計算

まず、柄の端から房の先端へ伸びる房の背骨曲線を定義する。図 5 で示すように柄の端と房の先端の二つの端点と柄の軸を延長した線と  $z = 0$  の画材平面との交点の 3 点を制御点とする Bezier 曲線を背骨曲線 (spine curve) とする。中央の制御点を柄の軸を延長した線と  $z = 0$  の平面との交点とすることにより、図 6 で示されるように筆を寝かせた場合、立たせた場合の自然な曲線変化を表現することが出来る。

次に、背骨曲線を軸として、そこに大小の五円玉のような円盤を通すことにより房の形状を作成する。こうして、丸筆の房の形状が作成される。

接地は各円盤が  $z = 0$  である画材平面と交差した時に発生する。そこで接地面の形状を各円盤が  $z = 0$  の面と交差した時に発生する線分の端点を結んで定義する。

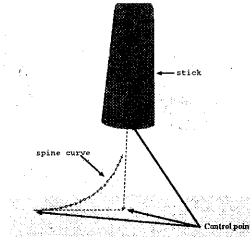


図 5: 背骨曲線の制御点

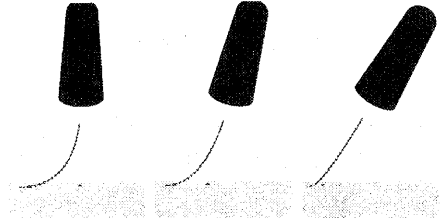


図 6: 筆の柄の姿勢と中央制御点の移動、曲線形状の関係

### 3.3 液体移動アルゴリズム

筆の内部には毛細管現象により絵の具が蓄えられている。また、紙等の画材と筆の間での絵の具の移動には重力に加えて、毛細管現象が働いている。

3.2 での円盤に絵の具を保持できるタンクを定義し、タンクの間をパイプで結んだモデルを作成する。各タンクには、一定量の絵の具を蓄積することが出来る。図 7 ではタンクとパイプを表示している。毛の形状変化に応じてタンクの位置も移動する。

画材は画像にした際の 1 ピクセル分の面積を単位微小領域とし、その一つ一つをセル (cell) と呼ぶ。セルは微量な絵の具を蓄えることが出来る。その量はセル毎に微妙に異なるようにする。今回は実際の紙のテクスチャをスキャナで取り込み、その濃淡からセル毎の蓄積可能量の不均一さを発生させている。また、蓄積可能量に比例して、1 タイムステップあたりの絵の具の移動可能量と毛細管現象を似せた引力を定義している。

定義されたタンク、セル間の絵の具の移動のプロセスは次の通りとする。

1. 絵の具にかかる力ベクトルを筆内部の絵の具の質量にかかる重力、接地面からの画材の毛細管現象による引力、筆内部の背骨線に沿って上方に生じる毛細管現象による筆の引力のベクトル和により決定する。
2. 力ベクトルの決定後、そのベクトル方向と近い向きへ各パイプ内の流れの方向を決定し、絵の具の移動を行う。

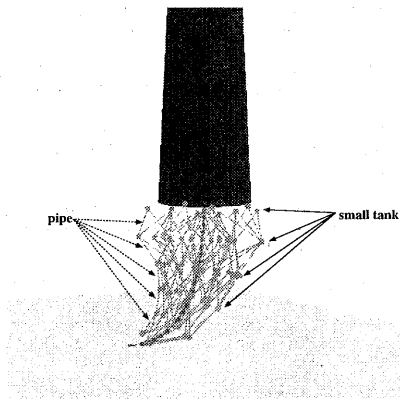


図 7: 筆内部の絵の具の蓄積モデル 微小なタンクとパイプを持つ

3. 2のステップを規定回数分、繰り返した場合には、処理を打ち切り終了する。そうでなければ、絵の具の移動後の力ベクトルを再計算する。力ベクトルの長さがある値よりも大きい場合、不均衡であるとして、2のステップへと戻る。力ベクトルがある値よりも小さい場合には処理を終了する。

## 4 実験

筆の房を外部からの柄の姿勢を入力として容易に制御可能であることを確認した後、実際にユーザにペンタブレットデバイスを用いて描画を行う実験を行った。

### 4.1 操作の容易性

筆の接地面の多様性と、柄の姿勢を入力することによる直観的な制御が可能であることを示す。図 8 は筆の柄、房の背骨曲線、そして房の接地面を三次元的に表示させた図である。柄の姿勢に応じて零形の接地面が自然に変化していることがわかる。図 9 は一連の接地面の形状変化を表したものである。接地面が動的に変化が可能であることがわかる。

### 4.2 描画結果例

描画のための入力装置には、Wacom の tablet を用い、得られる  $xy$ 、傾き  $tilt_x, tilt_y$  はそのまま、筆圧は  $z$  値として利用して、筆の位置・姿勢とした。絵の具のモデルには先に我々が提案したモデル [13] を用い、濃度、量に応じた発色が

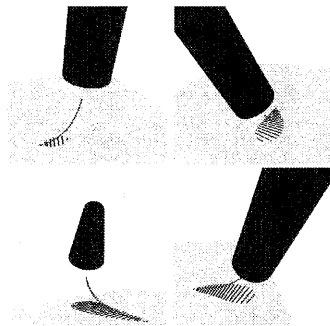


図 8: 筆の接地面の柄の姿勢からの導出結果例



図 9: 筆の接地面の動的変化

可能とした。以上の特徴を持つ最小限の機能を有すペイントツールを作成し、描画実験を行った。図 10 はひらがなの入力例である。はねの部分では、円盤の軌跡によるストローク描画では困難な描画が本筆モデルでは可能であることを表している。

次に絵を描いた例を図 11、図 12 に示す。

結果の描画例では、描画における個々のストロークの質が高いことから、少ないストロークでも十分に絵を構成できることが分る。特に、図 11 では 4 ストロークで描かれているが、“うなぎ”であることが分るような曲線を描くことが出来ている。また、図 12 の花びらような、より複雑な描画表現も可能であることが分る。

## 5 まとめ

本稿では、実時間での計算が可能な筆の三次元物理モデルの提案を行った。この筆モデルを用いることにより、従来のペイントツールで描画されるストロークよりも豊かな表現が可能となったことを描画例から示した。

このモデルでは三次元的な筆の形状を持つことにより、房の内部の液体移動について発展が可能である。よって、今後は液体移動のアルゴリズムを改良して滲みやカスレ等の表現を可能とするための検討を行っていく予定である。



図 10: ユーザによる平仮名の描画例

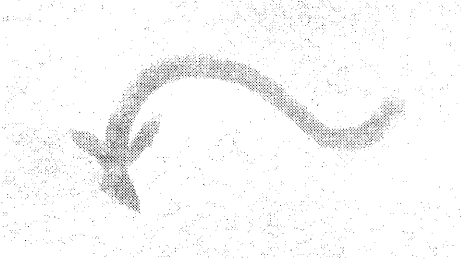


図 11: 描画結果例 1 うなぎ



図 12: 描画結果例 2 お花

- [9] Siu Chi Hsu, Irene H.H. Lee : " Drawing and Animation Using Skeletal Strokes ", SIGGRAPH '94 proceedings ,pp.109-118 (1994)
- [10] Steve Strassmann : "Hairy Brushes", Computer Graphics, Vol.20, No.4, pp.225-232 (1986)
- [11] Oinglian Guo: "Generating realistic calligraphy words" IEICE, E78A(11), pp 1556-1558, November (1996)
- [12] Jintae Lee: "Simulating Oriental Black-Ink Painting", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.19, No.3 pp.74-81,(1999)
- [13] 齋藤 豪, 中嶋 正之: "Kubelka-Munk の理論を用いたデジタルペインティングのための絵の具モデル", 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol. J82-D-II No.3, pp.399-406, (1999)
- [14] 齋藤 豪, 中嶋 正之: "ペイントツールのための筆モデル" 電子情報通信学会 春季総合大会, D-12-157 p.330 (1999)

## 参考文献

- [1] T.Cockshott et al.:"Modeling the Texture of Paint",Computer Graphics Forum ,Eurographics 92 Proc , Vol.11, No.3, pp.C217-C226 (1992)
- [2] Cassidy j. Curtis, Sean E. Anderson, Joshua E. Seims, Kurt W. Fleischer, David H. Salesin: "Computer-Generated Watercolor", SIGGRAPH97, proceedings pp. 421-430 (1997)
- [3] Saeko Takagi, Issei Fujishiro: "Microscopic Structural Modeling of Colored Pencil Drawings", SIGGRAPH 97 Visual Proceedings, p.187, (1997)
- [4] Michael P.Salisbury ,Sean E.Anderson ,Ronen Barzel ,David H.Salesin : "Interactive Pen-and-Ink Illustration", SIGGRAPH94 proceedings ,pp.101-108 (1994)
- [5] "Painter Web page" <http://www.metacreations.com/products>
- [6] "Photoshop Web page" <http://www.adobe.com/prodindex/photoshop/main.html>
- [7] "The Gimp Web page" <http://www.gimp.org/>
- [8] 高橋 淳也, 張 青, 村岡 一信, 千葉 則茂: "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レンダリング", NICOGRAPH (1996)