

# インタラクティブペインティングのための 力学的三次元筆モデル

齋藤 豪<sup>†</sup> 中嶋 正之<sup>†</sup>

素描画、水墨画や書道の描画においては、個々のストロークが表現上の重要な役目を果たすことがある。そこで計算機上で描画を行うならば、微妙で多様なストローク入力法の提供が必須の課題となる。しかし、従来のペイントソフトウェアでは円盤の軌跡に基づくストロークや、エアブラシのような効果を発生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の描画は困難である。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、タブレット型ペ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。提案モデルを用いた試作ペイントツールでの描画結果をあげ、従来のペイントソフトウェアと異なった描画が可能であることを示す。

## 3D Physics-based Brush Model for Interactive Painting

SUGURU SAITO<sup>†</sup> and MASAYUKI NAKAJIMA<sup>†</sup>

Strokes role important parts of expression in especially scratchy paintings, Indian ink painting and oriental calligraphy. To draw them on computer, therefore, input for subtle and various strokes should be prepared. However, strokes input techniques in current painting tools' brushes are almost based on a disc track or an air brush. Their expression is limited comparing with real brushes in the world which can draw subtly and variously. There are some studies to develop the expression. However their stroke input methods are not same as in the real world manner 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. Painting results on our experimental painting tool based on the brush model show that the model enables to draw novel type strokes on computer and allows subtle operation.

### 1. はじめに

描画作業を計算機上で行う利点は様々にある。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。そこで計算機上で画材のモデリングに関する研究が行われている<sup>1)~4)</sup>。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<sup>5),6)</sup>。

ストロークを描くための道具として筆に焦点をあけると、“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ともな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。

<sup>†</sup> 東京工業大学情報理工学研究所  
Graduate School of Information Science and Engineering,  
Tokyo Institute of Technology



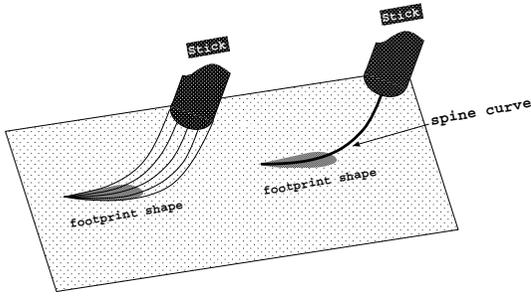


図2 筆の毛のモデリング  
Fig.2 Hair tuft modeling.

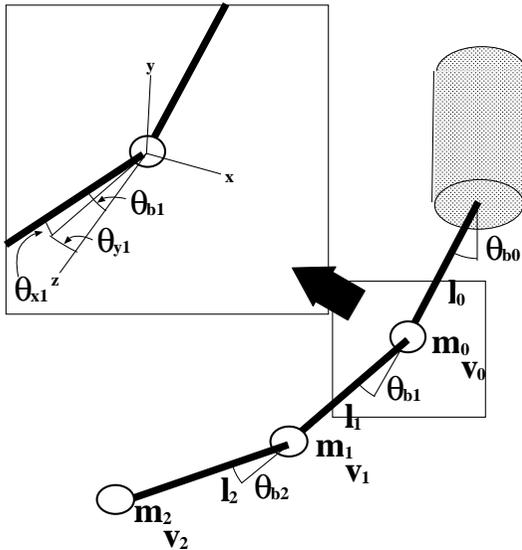


図3 背骨線の各部と変数，定数の対応付け  
Fig.3 Definition of the relationship between parts of the spine and static values.

であり、 $v_n, \theta_{bn}$  は  $\theta_{xk}, \theta_{yk}$  ( $k = 0 \sim n$ ) およ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  $v_n$  にある各関節部および、先端部の質量  $m_n$  が持つ位置エネルギー  $E_{pn}$  を次のとおりとする。ここで、 $g$  は重力加速度、 $v_{nz}$  は  $v_n$  の高さである。

$$E_{pn} = m_n g v_{nz} \tag{1}$$

[ 運動エネルギー ]

各関節部および、先端部の質量  $m_n$  が速度  $s_n$  のときの運動エネルギー  $E_{kn}$  を次のとおりとする。

$$E_{kn} = \frac{1}{2} m_n s_n^2 \tag{2}$$

[ 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  $\theta_{bn}$  としたときの抗力が  $K_{bn} \theta_{bn}$  で

あることから式 (3) で表される。

$$E_{bn} = \int K_{bn} \theta_{bn} d\theta_{bn} \tag{3}$$

$$= \frac{1}{2} K_{bn} \theta_{bn}^2$$

[ 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) で表す。

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

以上から背骨線の系全体のエネルギー  $E$  は式 (5) となる。

$$E = \sum_n E_{pn} + E_{bn} + E_{kn} + E_{fn} \tag{5}$$

ここで、背骨線の姿勢をシミュレートする問題は、 $E$  の最小値をとるパラメータを求めることに等しい。すなわち、系の外部から背骨線の付け根である柄の下端の座標  $x, y, z$ 、および、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  $\theta_{xk} \theta_{yk}$  ( $0 \leq k \leq n$ ) を求めればよいことになる。最小値を求めるために、ここでは Newton-Raphson 法を用いる。

関節の数が多くほど、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。図4は関節数が1, 2, 3のときの柄の曲線運動にともなった毛先の軌跡を示している。薄い sin カーブを描く線が柄の軌跡であり、それに対してどの関節数でもほぼ同じように毛先の軌跡を表す濃い線が遅れをともなって追従していることが分かる。このことから、関節数は1で十分とする。

3.2 房形状と接地面の定義

まず、柄の端から房の先端へ伸びる房の背骨曲線 (spine curve) を定義する。図5で示すように柄の端と房の先端の2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 Bézier 曲線を背骨曲線とする。中央の制御点を以上のように定義することにより、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できる。

次に、図7に示すように、背骨曲線を軸として、そ

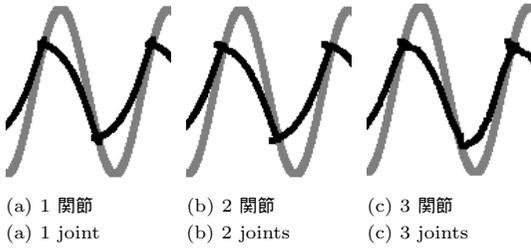


図4 sin 曲線を描画した際の結果．黒線、灰色線はそれぞれ毛の先端と柄の軌跡

Fig. 4 A sinusoid curve drawing by the brush model. Black and gray are tracks of the tuft tip and the stick respectively.

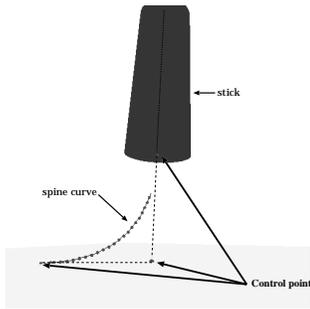


図5 背骨曲線の制御点

Fig. 5 Control points for the spine curve.

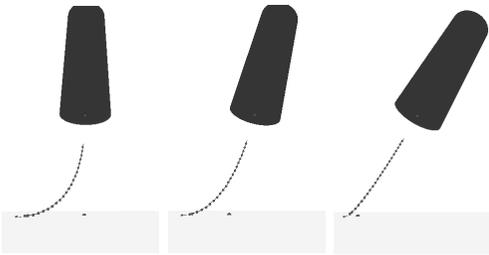


図6 筆の柄の姿勢と中央制御点の移動，曲線形状の関係

Fig. 6 The relationship between the position and posture of the handle and the spine curve shape.

ここに大小の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ときに発生する．そこで接地面の形状を各円盤が  $z = 0$  の面と交差したときに発生する線分の端点を結んで定義する．図7での平行線の領域が接地面である．

### 3.3 液体移動計算

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節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．

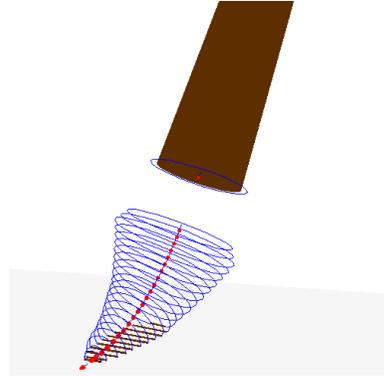


図7 筆の房と接地面

Fig. 7 The tuft and the grounding area of the brush model.

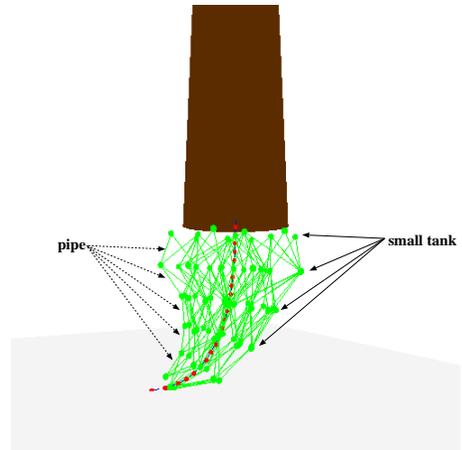


図8 筆内部の絵の具の蓄積モデル．微小なタンクとパイプを持つ  
Fig. 8 Paint liquid tanks and pipes in the tuft.

各タンクには，一定量の絵の具を蓄積することができる．図8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する二次元配列とし，単位微小領域をセル (cell) と呼ぶ．セルは微量な絵の具を蓄えることができ，その量はセルごと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，その濃淡からセルごとの蓄積可能量の不均一さを発生させている．また，蓄積可能量に比例する，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真似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にはセルオートマトンの手法を用いており，その概略は次のとおりである．

- (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．

```
paint_force();
```

- (2) カベクトルの決定後，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．

```
move_paint_according_to_force(a,v);
```

- (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，絵の具の移動後のカベクトルを再計算する．カ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．カ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．

```
if (length_of_vector(v)<LEN) break;
```

簡易言語で書き表すと以下ようになる．

```
i=0;
while(i<N){
  vector v = (0,0,0);
  foreach a (tank_set){
    v += a.paint_force();
  }
  if (length_of_vector(v)<LEN) break;
  foreach a (tank_set){
    move_paint_according_to_force(a,v);
  }
  i=i+1;
}
```

## 4. 実 験

提案する筆モデルが外部からの柄の姿勢を入力としたときに容易に制御可能であるかという評価と，試作ペイントツールを用いての実際の描画実験の結果を示す．

### 4.1 筆モデルの特性評価

筆の接地面の多様性と，柄の姿勢の入力から直観的な制御が可能であることを示す．図9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．柄の姿勢に応じて雫形の接地面が自然に変化していることが分かる．図10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可能であることが分かる．

### 4.2 描画結果例

試作ペイントツールの動作および開発環境を表1に

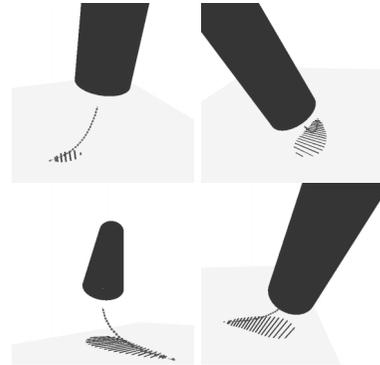


図9 筆の接地面の柄の姿勢からの導出結果例

Fig. 9 Results of footprints according to the brush handle postures.



図10 筆の接地面の動的変化

Fig. 10 Dynamic changes of the tuft footprint.

表1 試作ツールの動作，開発環境

Table 1 System and development environment for experimental painting tool.

CPU	450 MHz Intel PentiumII
Architecture	IBM PC compatible
OS	Linux
Graphics system	X window system
Graphic library	gtk+
Input device	Wacom pen tablet supported by XFree86

表2 Tabletの仕様

Table 2 The tablet specification for the system.

resolution	0.01 mm
position error	±0.25 mm
data ratio	200 point/sec
pressure level	1024 level
tilt level	±64 level
tilt error	0.2 digree

まとめる．

本モデルへの入力に重要な役目を果たす Wacom のタブレットは，コイルとコンデンサからなる共振回路を内蔵したペンと，交流磁界の発生とペンで発生する二次磁界を感知するセンサコイルを内蔵したタブレットからなる．ペンで発生する二次磁界の分布をセンサコイルで検出し，ペンの位置などを計測する<sup>17)</sup>．タブレットの計測機器としての仕様は表2のとおりである．



図 11 ユーザによる漢字「永」の描画例

Fig. 11 A drawing result of a Kanji character: 'Ei.'

tablet から得られる  $xy$ , 傾き  $tilt_x tilt_y$  の情報はそのまま, 筆圧は  $z$  値として, 本筆モデルの位置・姿勢とした.

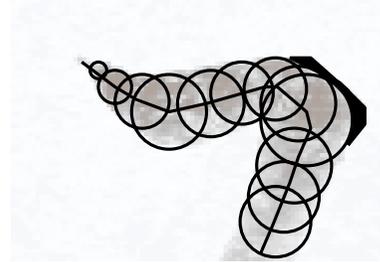
絵の具のモデルには先に我々が提案したモデル<sup>18)</sup>を用い, 濃度, 量に応じた発色を可能とした.

以上のモデルを用いて最小限の機能を有するペイントツールを作成し, 描画実験を行った. 図 11 は図 1 で示した「永」の字を本筆モデルで描画した結果である. その一部の拡大図が図 12 (a) である. 入力を仮に円盤の軌跡によるストローク描画で行おうとすると, その軌跡は円群で表されるようにならざるをえない. したがって, 本手法では表現されている繰り返し部分の角の表現が円盤の軌跡による手法では不可能である. また, 図 12 (b) のような濃淡は雫型の接地面を持つ本筆モデルならば表現可能であるが, 円盤の軌跡による手法では不可能である. このように, 直接的にストロークを入力する従来方法では困難であった各種の筆法が本筆モデルでは描画可能であることが分かる.

次に絵を描いた例を図 13, 14, 15 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かる. 図 13 では 4 ストロークで描かれているが, “うなぎ” であることが分かるような曲線を描くことができている. ストロークの描き出しの部分や, 曲線の内側と外側で微妙に濃度が異なり, 単純な線になっていないからである. これらの曲線は雫型の接地面の軌跡による描画特徴を表しているといえる.

図 14 も単純なストロークのみでの描画例である. 背の部分のストロークは筆先の軌跡が遅れて追従することにより柄の軌跡と微妙に異なることを利用して描



(a) comparison to a conceptual desc track



(b) a characteristic gradation by a drop shape footprint of the brush model.

図 12 「永」の部分拡大図, 円盤軌跡描画法との比較

Fig. 12 A part of the zooming up of 'Ei.'

かれている.

また, 図 15 の花のような, より複雑な描画も可能であることが分かる.

## 5. まとめ

本論文では, 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. 雫型の筆の接地面の動的な変化が, 多様なストロークの描画を可能としている. またその変化の制御を入力デバイスから直接的, 直観的に行えるという特徴を本モデルは持つ. さらに, 液体移動計算により, ストローク形状のみでなく, 微妙なストロークの濃淡の描画も可能としている.

従来多く用いられている円盤軌跡を用いた描画に比べて計算量は増加するが, 物理モデルとしては非常に簡単化されており, 本手法が実時間で計算が可能であることも試行描画から確認できた.

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. また, 書道家や画家との検討を行っていく予定である.



図 13 描画結果例 1 : うなぎ  
Fig. 13 A painting result1: an eel.



図 14 描画結果例 2 : とり  
Fig. 14 A painting result2: a bird.



図 15 描画結果例 3 : 花  
Fig. 15 A painting result3: flowers.

## 参考文献

- 1) Cockshott, T., et al.: Modeling the Texture of Paint, *Proc. Eurographics 92*, Vol.11, No.3, pp.C217–C226, Computer Graphics Forum (1992).
- 2) Curtis, C.J., Anderson, S.E., Seims, J.E., Fleischer, K.W. and Salesin, D.H.: Computer-Generated Watercolor, *Proc. SIGGRAPH97*, pp.421–430, ACM (1997).
- 3) Takagi, S. and Fujishiro, I.: Microscopic Structural Modeling of Colored Pencil Drawings, *Visual Proc. SIGGRAPH97*, p.187, ACM (1997).
- 4) Salisbury, M.P., Anderson, S.E. and Barzel, D.H.R.: Interactive Pen-and-Ink Illustration, *Proc. SIGGRAPH94*, pp.101–108, ACM (1994).
- 5) 齋藤 豪, 中嶋正之: ペイントツールのための筆モデル, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, Vol.D-12-157, p.330 (1999).
- 6) Saito, S. and Nakajima, M.: 3D Physics-Based Brush Model for Painting, *SIGGRAPH99 Conference Abstracts and Applications*, p.226 (1999).
- 7) 金田一京助, 金田一春彦, 見坊豪紀, 柴田 武: 国語辞典, 第3版, 三省堂 (1983).
- 8) Painter Web page. <http://www.metacreations.com/products>.
- 9) Photoshop Web page. <http://www.adobe.com/prodindex/photoshop/main.html>.
- 10) The Gimp Web page. <http://www.gimp.org/>.
- 11) 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 論文集 1996*, pp.95–101 (1996).
- 12) Hsu, S.C. and Lee, I.H.H.: Drawing and Animation Using Skeletal Strokes, *Proc. SIGGRAPH94*, pp.109–118, ACM (1994).
- 13) Strassmann, S.: Hairy Brushes, *Computer Graphics*, Vol.20, No.4, pp.225–232 (1986).
- 14) Guo, O.: Generating realistic calligraphy words, *IEICE*, Vol.E78A, No.11, pp.1556–1558 (1996).
- 15) Pham, B.: Expressive brush strokes, *CVGIP*, Vol.53, No.1, pp.1–6 (1991).
- 16) Lee, J.: Simulating Oriental Black-Ink Painting, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.19, No.3, pp.74–81 (1999).
- 17) Interface 編集部: タブレット/デジタイザのしくみ, *Interface*, Vol.22, No.4, pp.91–95 (1996).
- 18) 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).

(平成 11 年 8 月 31 日受付)

(平成 12 年 2 月 4 日採録)



齋藤 豪 (正会員)

昭和 46 年生。平成 6 年東京工業大学工学部情報工学科卒業。平成 11 年同大学院博士課程修了。同年より同大学精密工学研究所助手。コンピュータグラフィックス, 画像処理の研究を行う。工学博士。



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)等, 画像処理関連多数あり。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。