

油絵シミュレータ上での 3 次元筆モデル

岡部 雄太[†] 齋藤 豪[†] 中嶋 正之[†][†]東京工業大学 大学院 情報理工学研究科

1 はじめに

近年、計算機上での絵画生成が広く行なわれるようになってきた。その理由として、作品の劣化がない、デジタルメディアとの親和性が高い、手軽にできる、やり直しができるなど様々な理由が上げられる。従来の画材の中でも筆は広く利用されていて、非常に表現力が高い画材であるため、計算機上で筆のストロークを描くシステムが数多く提案されてきた。

筆ストロークを生成する代表的な手法として、仮想 3D 筆モデルを生成し、その筆モデルに基づいて対話的にストロークを生成する手法が存在する [1, 2, 4]。しかし、これらの仮想筆モデルでは、毛の安定形状を求めるために物理シミュレーションに基づいたエネルギー最小化問題の収束計算を解くため、収束誤差を生んだり、計算コストがかかるといった問題があった。そこで、本手法では Quadratic Deformations [3] というメッシュ形状変形手法を拡張した K-Power Deformations を提案し、毛の形状変形に利用することにより、毛の硬さを反映した筆の毛の房のしなりを簡単な行列演算で高速かつ安定して計算することが可能となった。本項では、油絵で利用される平筆と丸筆の 3 次元筆モデルを油絵シミュレータ上に実装し、これらの筆によって表現力豊かなストロークが生成できることを確かめた。

2 筆の毛の形状変形

本節では、油絵で利用される平筆と丸筆の毛の形状変形を行う。筆の毛の形状はメッシュの頂点集合で定義される。これらの頂点位置を変える事により筆の形状変形を行なう。本稿では、従来のメッシュ形状変形手法の Quadratic Deformations [3] を拡張した K-Power Deformations を提案し、筆の毛の形状変形に利用する事により、単純な行列演算で毛の形状変形を計算可能となった。

2.1 K-Power Deformations に基づく形状変形

まず最初に、筆の毛の房がキャンバスに接触したときに起こる形状変形を K-Power Deformations の基となった Quadratic Deformations で行う方法を述べる。メッシュ頂点の初期座標および目標座標をそれぞれ $a(i) \in \mathbb{R}^3$ と $b(i) \in \mathbb{R}^3$ で表す。このとき、各座標は重心からの相対座標で表し、各頂点の質量を $m(i)$ とする。変形後の相対位置 $g(i) \in \mathbb{R}^3$ は以下のように計算さ

れる。

$$g(i) = \bar{A}_{ba} \bar{A}_{aa} \bar{a}(i) \\ = \left(\sum_i m(i) b(i) \bar{a}^\top(i) \right) \left(\sum_i m(i) \bar{a}(i) \bar{a}^\top(i) \right)^{-1} \bar{a}(i) \quad (1)$$

ただし、 $\bar{a}(i) = [a_x, a_y, a_z, a_x^2, a_y^2, a_z^2, a_x a_y, a_y a_z, a_z a_x]^\top \in \mathbb{R}^9$ である。対称行列 $\bar{A}_{aa} \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ と $\bar{a}(i)$ は前もって計算しておく事ができるため、実質的な計算は $\bar{A}_{ba} \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ を求めるだけであり、高速に計算することができる。

ここで、筆の毛の初期形状のメッシュ頂点座標を $a(i)$ 、目標形状のメッシュ頂点座標を $b(i)$ 、変形後のメッシュ頂点座標を $g(i)$ と置き換えて (1) 式を解く事により筆の形状変形を行なう。

目標形状 $b(i)$ は次のように求める。ユーザから入力された位置や回転に従って $a(i)$ を移動し回転させ、キャンバス下にめり込んだ頂点だけを頂点間の距離と毛の根元から毛先にかけての方向を維持しつつキャンバス上に移動させることで $b(i)$ を生成する。図 1 には平筆の毛の形状変形の基本的な流れを示している。図 1(a) は $a(i)$ を筆の入力に従って移動回転したときの頂点配置であり、(b) は筆の目標形状における頂点配置 $b(i)$ である。

Quadratic Deformations では、形状のしなりは 2 次関数で近似されるため、毛の形状変形に利用すると、常に同じ硬さの毛のしなりしか生成できない。そこで、形状のしなりを K 次関数に拡張することにより、様々な硬さの毛の形状変形を実現する。Quadratic Deformations のしなりを実現する要素は、 $\bar{a}(i)$ における第 4, 5, 6 成分である。この次数を可変にすることにより、しなり方を制御できるようにする。つまり、K-Power Deformations では、 $\bar{a}(i) = [a_x, a_y, a_z, |a_x|^K, |a_y|^K, |a_z|^K, a_x a_y, a_y a_z, a_z a_x]^\top \in \mathbb{R}^9$ として定義される。本稿では、 K の範囲を $1 < K < 2$ で調整し、様々な硬さの毛のしなりを表現した。ただし、 K 次関数の原点における傾きは不連続であるため、メッシュ頂点の初期座標 $a(i) \in \mathbb{R}^3$ と目標座標 $b(i) \in \mathbb{R}^3$ は毛の根元からの相対座標で表し、傾きの不連続性が形状に表れないようにする。

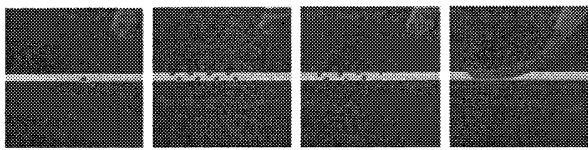
図 1(c) は $K = 1.5$ で K-Power Deformations を適用したときの頂点位置であり、(c) の頂点に面を貼りつけることで (d) のような筆の形ができあがる。

2.2 筆圧および摩擦の影響

筆の毛の房はキャンバスに押しつけると広がる。また、筆を動かしたときにキャンバスと筆の毛との間の摩擦によって毛がしなる。これらの効果を筆の毛の変形に取り入れるために、目標形状における頂点配置 $b(i)$ に対して、筆圧を加えると毛先が広がり、筆を動かしたときには動かした方向と逆向きに毛がしなるような変形を加える。この目標形状に対して K-Power Deformations

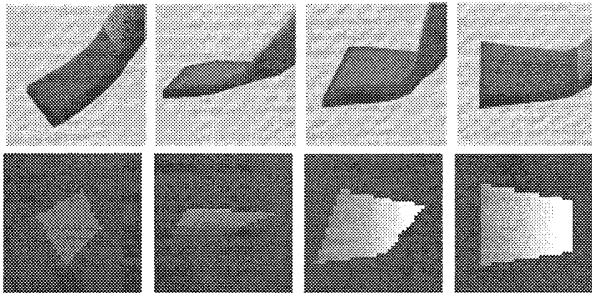
3D Brush Model on Oil Painting Simulator

Yuta OKABE[†], Suguru SAITO[†] and Masayuki NAKAJIMA^{††}[†]Graduate School of Information Science & Engineering,



(a) (b) (c) (d)

図1 K-Power Deformationsを用いた平筆の房の形状変形



(a) (b) (c) (d)

図2 平筆の毛の房形状及びフットプリント上の筆圧分布

を適用し、筆圧や摩擦による毛のしなりを実現した。このようなビジュアルフィードバックを加える事により、本物の筆を使っているような使用感をユーザに与える事ができる。

3 フットプリント上の筆圧分布

フットプリントはキャンバスに接触する筆の房の頂点の4隅の座標で表される4角形の内部として定義される。フットプリント上の筆圧分布はフットプリントの4隅の点における筆圧値をOpenGLの色補間機能によって自動的に計算される。フットプリントの4隅の筆圧値は、圧力センサから取得された毛先と根元での筆圧の傾向を反映するように設定した。つまり、房の根元側の筆圧が毛先側に比べて強くなるように設定した。

図2には、平筆の様々な房形状とそのときのフットプリント上の筆圧分布を示している。筆圧は白いほど強く黒いほど弱い。この結果から、様々な形のフットプリント形状が計算され、その内部の筆圧分布が連続的に表現されていることが分かる。

4 筆モデルの評価

本稿で提案した筆モデルをカスタマイズ性、計算速度の面から評価を行う。従来では、筆の形状変形にばねモデルなどの物理シミュレーションを用いていたため、筆の大きさが変わるとばね定数などのパラメータを適切に設定しなおす必要があった。しかし、本手法における筆の形状変形モデルは任意の大きさの筆に対して同じ手法で計算が行なえるため、筆の形状を拡大縮小するだけで細い筆から刷毛のように幅広い筆、あるいは毛の長い筆など様々な大きさの筆を簡単に自由に生成する事ができる。そのため、ユーザは任意の大きさの筆を生成し利用することができ、従来手法よりも高いカスタマイズ性をユーザに提供することができる。

次に、計算時間に関して考察を行う。本稿の筆モデルは筆先が広がる現象が実現できることから、従来手法の中でChuらの手法[2]で表現できる筆モデルと同等の能力を持つ。そこで、彼らの筆の毛の房の形状変形の計算時間をAthlon 64 x2 3800+上で計測した結果、約79.3fpsであった。一方、本論文で提案した筆モデル



図3 油絵シミュレータ上での生成結果

の形状変形は約790.1fpsであった。これより、従来の筆モデルの10倍近い速度を実現できていることが示された。

5 油絵シミュレータ上での実装

本稿の筆モデルを油絵シミュレータ上で実装した。ペンタブレットにより筆モデルを操作し、サンプリング点ごとのフットプリント上の筆圧分布に基づいてストロークが生成される。

実際に油絵シミュレータにより生成された結果を図3に示す。この結果から、多様なストロークが本稿の筆モデルにより生成できることを示した。

6 おわりに

本稿では、K-Power Deformationsに基づく筆の毛の房形状の変形計算を提案し、高速で安定した筆の形状変形を実現した。また、従来手法と比べて高いカスタマイズ性を備えていて、計算速度も従来の約10倍であることを示した。また、本稿の筆モデルを油絵シミュレータ上で実装し、多様なストロークが実現できることを示した。

参考文献

- [1] Bill Baxter, Vincent Scheib, and Ming C. Lin. dab: interactive haptic painting with 3d virtual brushes. In *SIGGRAPH2001 conference proceedings*, pp. 461-468. ACM, ACM Press, 2001.
- [2] Nelson S.H. Chu and Chiew-Lan Tai. Real-time painting with an expressive virtual chinese brush. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 24, No. 5, pp. 76-85, 2004.
- [3] Matthias Müller, Bruno Heidelberger, Matthias Teschner, and Markus Gross. Meshless deformations based on shape matching. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 471-478, 2005.
- [4] Suguru Saito and Masayuki Nakajima. 3d physics-based brush model for interactive painting. *Information Processing Society of Japan*, Vol. 41, No. 3, pp. 608-615, 2000.