

仮想書道のための柔軟な穂先をもつ毛筆モデルの提案 A Proposal of Brush Model with Flexible Tip for Virtual Calligraphy

金山知俊[†]
Chishun Kanayama

1. はじめに

AR や VR の技術を用いて書道を再現する仮想書道システムで用いるための柔軟な穂先をもつ毛筆モデルを提案する。書道用の筆は多くの毛を束ねて作られた長い穂先をもち、その穂先が大きく変形しながら筆跡を生成する。仮想書道においても穂先の変形を力学的に再現することで実際の毛筆と同様の筆跡を得ることが期待される。著者は以前に AR マーカやペンタブレットを入力デバイスとした仮想書道システムの実現について検討しているが、筆跡は既存のテクスチャを貼り付けることで生成しており、毛筆の穂先の力学的挙動については実現できていなかった [6]。本研究では Bergou らによる Discrete Elastic Rods モデル [1] を用いて穂先の変形シミュレーションを行う。穂先を構成する多数の毛を複数の rod で表現し、rod がもつ墨の量に応じて毛のまとまり具合を調節することで筆記中の穂先の変化を再現する。

2. 毛筆モデル

書道や習字で用いられる毛筆は、竹などを素材とした軸と動物の体毛を束ねた穂先で構成される。穂先は小筆で 2~4cm、大筆で 5~10cm ほどの長さになり、筆記中に穂先全体が大きく変形することも多い。本研究では図 1 のように穂先を構成する毛を複数の束に分割し、それぞれを変形する rod とみなすことで穂先の変形を再現することを目指し、その手法として Discrete Elastic Rods モデル [1] を用いる。

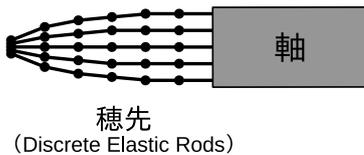


図 1: 毛筆モデル

2.1. Discrete Elastic Rods

Discrete Elastic Rods モデルによると、rod の弾性によるエネルギー $E(\Gamma)$ は曲げのエネルギー $E_{bend}(\Gamma)$ とねじりのエネルギー $E_{twist}(\Gamma)$ の合計として次式で求められる。

$$E(\Gamma) = E_{bend}(\Gamma) + E_{twist}(\Gamma)$$

$$E_{bend}(\Gamma) = \frac{1}{2} \int (\boldsymbol{\omega} - \bar{\boldsymbol{\omega}}) \mathbf{B} (\boldsymbol{\omega} - \bar{\boldsymbol{\omega}})^T ds$$

[†]南山大学理工学部ソフトウェア工学科

$$E_{twist}(\Gamma) = \frac{1}{2} \int \beta m^2 ds$$

ここで Γ は rod の形状、 $\boldsymbol{\omega}, \bar{\boldsymbol{\omega}}$ は変形状態と初期状態の rod の曲率ベクトル、 m は rod のねじり量、 \mathbf{B} は曲げ剛性行列、 β はねじれ剛性である。変形シミュレーションを行うには、rod を複数の節点のリンクとして離散化し、弾性エネルギーから求まる節点ごとの力を運動方程式に組み込んで数値計算を行う。本研究では rod に働く力を次式で求める。

$$\mathbf{F} = -\frac{dE(\Gamma)}{d\mathbf{x}} + M\mathbf{g} - \nu\mathbf{v}$$

ここで $\mathbf{x}, \mathbf{v}, \mathbf{F}$ は rod の中心軸の座標を示す節点の位置、速度、力であり、 M は節点の質量を対角に並べた行列、 \mathbf{g} は重力加速度、 ν は節点の速度に比例する減衰係数である。

時刻 $t + \Delta t$ の節点の速度 $\mathbf{v}(t + \Delta t)$ 、位置 $\mathbf{x}(t + \Delta t)$ はシンプレプティックオイラー法により次式で求める。

$$\mathbf{v}(t + \Delta t) = \mathbf{v}(t) + M^{-1}\mathbf{F}(t)\Delta t$$

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = \mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t + \Delta t)\Delta t$$

2.2. 紙面との摩擦

筆の穂先が紙面に接触したとき、穂先と紙面との間に摩擦が発生する。紙面に接触した節点は摩擦により静止あるいは速度が変化すると考え、紙面に平行な速度成分 \mathbf{v}_T^* を次式で決定する [2]。

$$\mathbf{v}_T^* = \max\left(1 - \mu \frac{v_N}{|\mathbf{v}_T|}, 0\right) \mathbf{v}_T$$

ここで μ は摩擦係数、 \mathbf{v}_T は接触前の節点の紙面に平行な速度成分、 v_N は紙面に垂直な速度成分である。なお、紙面と節点の衝突は制約 (2.4 節) で処理する。

2.3. 毛束同士の衝突と吸着

本研究の穂先は複数の rod によって構成され、それぞれの rod の運動は個別に求める。ただし、rod 同士の衝突は回避しなければならない。また、墨を含む穂先がまとまる様子を再現するには rod 同士の吸着を実現する必要がある。本研究では隣接する rod 間の衝突回避と墨の量に応じた吸着力を与えることで墨を含む穂先を再現する。本稿執筆時にはこの処理は実装の途中であるが、近日中に実現する予定である。

2.4. 制約

毛筆の穂先は筆記中に長さ方向の伸縮を発生させないようにする必要がある。また、穂先の根本は筆の軸に結合していなければならない、紙面を突き抜けてはいけない。これらに対応するため、本研究では穂先の運

動計算後に制約を与えることで節点の位置，速度を修正する．制約の手法としては Goldenthal らによる fast projection 法 [3] を用いる．

本モデルで使用している制約は以下の3つである．

- 軸との接続: $\mathbf{x}_i - \mathbf{r} - (\bar{\mathbf{x}}_i - \bar{\mathbf{r}}) = 0$
 \mathbf{x}_i : rod の根本の2節点 ($i = 0, 1$)
 \mathbf{r} : 軸重心, $\bar{\mathbf{x}}_0, \bar{\mathbf{r}}$: \mathbf{x}_0, \mathbf{r} の初期位置
- 非伸長制約: $\mathbf{e}^i \cdot \mathbf{e}^i - \bar{\mathbf{e}}^i \cdot \bar{\mathbf{e}}^i = 0$
 \mathbf{e}^i : 節点 $i, i+1$ 間の辺 ($\mathbf{e}^i = \mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i$)
 $\bar{\mathbf{e}}^i$: \mathbf{e}^i の初期状態
- 紙面との衝突: $x_{iz} = 0$
 x_{iz} : 節点 x_i の z 成分 (紙面が xy 平面のとき)

これらの制約式から制約ベクトル \mathbf{C} を構成し，制約条件付きの運動エネルギーの式 $\mathbf{v}M\mathbf{v}^T - \mathbf{C}^T\boldsymbol{\lambda}$ が最小値となるまで反復計算を行う．なお， $\boldsymbol{\lambda}$ は Lagrange 乗数ベクトルである．

反復計算が完了したら制約なしの節点位置からの変位 $\delta\mathbf{x}$ が求まるので，そこから節点の位置，速度を更新する．

3. シミュレーション

本モデルの効果を確認するため，穂先を表す rod のテストプログラムを作成した．実装には libigl[4] と Eigen[5] を使用した．本稿執筆時には剛性や節点間距離を同一とした均一の rod を3本までとしてシミュレーションを行っている．各 rod の節点数は10，節点間距離は5mm，シミュレーションのタイムステップは1msである．毛筆の軸は簡易的に球体として表現している．紙面上に押し付けられた rod が変形のエネルギーが最小となるように形を保ちながら曲がる様子や，移動中の摩擦による穂先の方向変化が実現できていることを確認した(図2)．ただし，現在の実装では大きな曲げ変形から節点位置の振動や発散が発生してシミュレーションが破綻する場合がある．本研究で時間発展の計算に使用しているシンプレティックオイラー法は陽解法であり，シミュレーションを安定に実行するにはタイムステップを十分短くしなければならない．一方，リアルタイム処理のためにはなるべく長いタイムステップが望ましい．高速化の工夫をまだ導入していないこともあるが，現状では1ステップの計算に10ms以上の時間が必要である．これらの問題を解決するため，陰解法による時間発展の計算を検討している．また，毛筆では穂先に含まれる墨の量により毛束の分離や筆跡のかすれが発生する．これを表現するため，毛束の衝突や墨の量に応じた毛束同士の吸着についてもモデルに追加する．また，現在は穂先の変形シミュレーションのみで，筆記動作の入力や筆跡の生成についてはまだ実現できていない．前者についてはペンタブレットを入力デバイスとして仮システムを実現する[6]．後者については紙面に接触した節点の軌跡から筆跡を生成する予定であり，まずは線分やテキストチャートによる筆跡生成を実現し，その後墨の量に応じた筆跡やかすれの表現を実現したい．

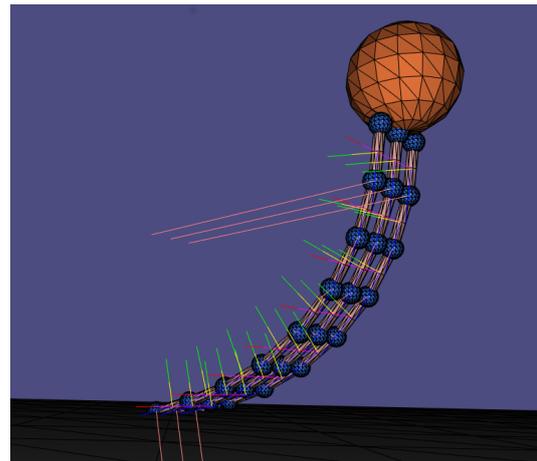


図2: 穂先の変形

4. おわりに

仮想書道システムで用いるための柔軟な穂先をもつ毛筆モデルを提案した．毛筆の穂先は複数の毛束に分け，それぞれを Discrete Elastic Rods モデルを用いて表現し，穂先の変形を再現する．現状は3本までの rod のシミュレーションを実現した段階であり，毛筆の穂先らしい変形と動きを確認している．今後はシミュレーションの安定化と高速化のための陰解法の導入，毛束の衝突回避と墨によるまとまりの表現，ペンタブレットによる筆記動作の入力，筆跡イメージの生成を実装し，仮想書道システムの実現を目指す．

参考文献

- [1] Bergou M., Wardetzky M., Robinson S., Audoly B., Grinspun E.: Discrete Elastic Rods, *ACM Trans. Graph.*, 27, 3 (2008).
- [2] Bridson R., Fedkiw R., Anderson J.: Robust Treatment of Collisions, Contact and Friction for Cloth Animation, *ACM Trans. Graph.*, 21, 3 (2002).
- [3] Goldenthal R., Harmon D., Fattal R., Bercovier M., Grinspun E.: Efficient Simulation of Inextensible Cloth, *ACM Trans. Graph.*, 26, 3 (2007).
- [4] Jacobson A., Panozzo D., others: libigl - A simple C++ geometry processing library, <http://libigl.github.io/libigl/>, (2017).
- [5] Guennebaud G., Jacob B., others: Eigen v3, <http://eigen.tuxfamily.org>, (2010).
- [6] 金山知俊: マーカ認識とペンタブレット入力による運筆測定を利用した仮想書道システム, *NICO-GRAPH 2011 秋季大会*, (2011/9/5).