

位置ベース法に基づく仮想書道のための毛筆モデル A Brush Model for Virtual Calligraphy based on Position Based Dynamics

金山 知俊[†]

Chishun Kanayama

1 はじめに

コンピュータ上で書道を再現する仮想書道モデルで用いるための位置ベース法に基づく毛筆モデルを提案する。書道や習字で用いる毛筆の穂は長く柔軟で、筆記中はその穂を穂を変形させながら筆跡を生成する。その様子をシミュレーションで再現することができれば、仮想書道においても実際の毛筆と同様の筆跡が得られることが期待される。仮想書道システムの実現には筆記動作の取得、穂の変形の再現、筆跡生成の3つの要素が必要であり、これまでも各要素の実現をめざして研究を行ってきた [4, 5, 6]。本研究は穂の変形の再現手法として、位置ベース法である Position Based Dynamics (PBD)[2] に基づく Position Based Elastic Rods モデル [3] を用いる。穂を構成する毛束を複数の rod で表現し、墨の量に応じて毛束のまとまり具合を調節することで筆記中の穂の変化を再現する。この毛筆モデルによる効果を確認し、仮想書道システムへの実装を行う。

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、絵筆や刷毛とは異なり、筆記中に穂を大きく変形させながら筆記することも多い。本研究では図 1 のように穂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 とみなすことで穂の変形を再現することを目指している。

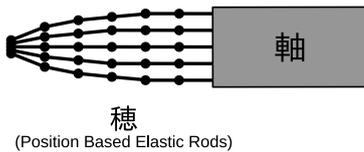


図 1 毛筆モデル

この毛筆の穂を再現する手法として、筆者は以前に Discrete Elastic Rods モデル [1] を用いた手法を試みており、穂を模した rod が紙面に押し付けられた際の変形を再現可能であることを確認しているが、シミュレーションの安定性やリアルタイムの処理に課題があった。Position Based Dynamics (以下、PBD)[2] は安定性やリアルタイム処理に向けた変形物体のシミュレーション手法としてコンピュータアニメーションの分野で広く用いられている。Discrete Elastic Rods モデルに PBD の手法を取り入れた Position Based Elastic Rods モデル [3] も提案されており、本研究ではその手法を用いる。

2.1 Position Based Elastic Rods

Position Based Elastic Rods モデルでは、ロッドの中心線を $N+1$ 個の頂点 $\{p_0, p_1, \dots, p_N\}$ で離散化する。また、隣接する頂点を結ぶ辺 $e \in \{1, \dots, N\}$ に対し、辺の中間点から辺に直交する方向に仮想点

[†] 南山大学理工学部ソフトウェア工学科

$p_e^g \in \mathbb{R}^3$ を配置する。頂点と仮想点はいずれも質量 $\{m_0, \dots, m_N\}, \{m_1^g, \dots, m_N^g\}$ をもつ。辺 e の姿勢を示すフレーム D_e は次式で定義される。

$$\begin{cases} d_e^3 = (p_e - p_{e-1}) / |p_e - p_{e-1}| \\ d_e^2 = d_e^3 \times (p_e^g - p_{e-1}) / |d_e^3 \times (p_e^g - p_{e-1})| \\ d_e^1 = d_e^2 \times d_e^3 \end{cases}$$

$$D_e = [d_e^1, d_e^2, d_e^3]$$

ロッドの変形によって D_e が変化すると、辺 e には次式で示される変形のエネルギーが発生する。

$$V_e = \frac{\bar{l}_e}{2} \sum_{i=1}^3 K_{ii} (\Omega_i - \bar{\Omega}_i)^2$$

ここで \bar{l}_e は辺 e の初期長さ、 $\Omega_i, \bar{\Omega}_i$ はロッドの方向変化を示すダルブーベクトルと呼ばれるパラメータの要素とその初期値、 K_{ii} はロッドの剛性係数である。なお、 $i=1, 2$ は曲げ変形、 $i=3$ はねじり変形である。

2.1.1 制約

PBD では頂点の位置変化に制約を与えることで弾性を表現する。PBD のスキームにおいて次時刻の頂点は次式で求められる。

$$p^{t+\Delta t} = p^t + \Delta t(v^t + \Delta t g) + \Delta p$$

ここで Δp は制約による位置更新であり、次式を解くことで求められる。

$$\Delta p = \arg \min_{\Delta p} \sum_{a \in \mathcal{A}} m_a |\Delta p_a|^2, \quad C(p + \Delta p) = 0$$

$$\Delta p_a = (w_a \nabla_a C) \left(\sum_{b \in \mathcal{A}} (w_b \nabla_b C)^T \nabla_b C \right)^{-1} C$$

\mathcal{A} は制約に関連する頂点の集合、 w_a, w_b は節点の質量の逆数、 C は制約である。

Position Based Elastic Rods モデルでは辺の非伸長制約、曲げねじり制約、端点の制約が考えられる。

非伸張制約 辺 e の長さを保つ制約は次式で与えられる。

$$C_e^L(p_{e-1}, p_e) = |p_{e-1} - p_e| - \bar{l}_e$$

また、辺に対する仮想点の位置を保つ制約として以下の2式が必要となる。

$$C_e^P(p_{e-1}, p_e, p_e^g) = (p_e^g - p_{e-1/2})^T (p_e - p_{e-1})$$

$$C_e^D(p_{e-1}, p_e, p_e^g) = |p_{e-1/2} - p_e^g| - \bar{l}_e^g$$

ここで $p_{e-1/2} = (p_{e-1} + p_e)/2$ は辺 e の中間点、 \bar{l}_e^g は仮想点と辺との距離である。

曲げねじり制約 rod の曲げ、ねじり変形に対する制約は次式で与えられる。

$$C_e^{BT}(p_{e-1}, p_e, p_{e+1}, p_e^g, p_{e+1}^g) = \begin{pmatrix} \Omega_1 - \Omega_1^{Goal} \\ \Omega_2 - \Omega_2^{Goal} \\ \Omega_3 - \Omega_3^{Goal} \end{pmatrix}$$

ここで $\Omega_i^{Goal} = (1 - \alpha_i)\Omega_i + \alpha_i\hat{\Omega}_i$, $\alpha_i \in [0, 1]$ は制約の目標となるダルブーベクトルであり, 剛性パラメータ α_i の値によって弾性の強さを調整することができる.

端点の制約 文献 [3] では端点の制約として rod がフレーム, 三角形平面, 剛体に取り付けられている 3 つのケースを挙げている. 毛筆の穂の根本は軸に固定されており, 軸の位置, 姿勢は筆記動作のみによって決定され, 穂の変形の影響を受けないと考えられるので, 本研究では rod の変形の影響を受けないフレームへの接続を用いる. rod 端点の相対的な固定方向を保つための制約は次式で与えられる.

$$C_f^O(p_0, p_1, p_1^g) = (\alpha_1\Omega_1, \alpha_2\Omega_2, \alpha_3\Omega_3)^T$$

また, rod 端点の位置を保つ制約は次式で与えられる.

$$C_f^T(p_0') = |q - p_0|$$

ここで $q \in \mathbb{R}$ は rod の端点を固定する軸の位置である.

2.1.2 紙面との接触

毛筆の穂の紙面への接触は PBD 法の衝突検出と同様に処理する. rod の頂点 p が紙面に接触または貫通した場合, 以下の式を制約に加える.

$$C_p(p) = (p - q_s) \cdot n_s$$

ここで q_s は p に最も近い紙面上の位置, n_s は紙面の法線ベクトルである.

2.1.3 毛束同士の衝突と吸着

本研究では毛筆の穂を複数の毛束に分け, それらを変形する rod で構成する. それぞれの rod の変形は個別に

求めるが, rod 同士の衝突回避と穂に含まれる墨の量によって穂を構成する毛束がまとまる様子を再現するため, 隣接する rod の近接頂点間の距離を保つ処理を追加する.

3 おわりに

提案手法の効果を確認するため, PBD 法および Position Based Elastic Rods モデルを用いた毛筆モデルをテスト用のシミュレーション環境に現在実装中である. 実装が完了し, 提案手法の効果を確認次第, 仮想書道システムに組み込む予定である. 仮想書道システムの実現には穂の変形以外に毛筆の筆記動作の取得と筆跡の生成が必要である. 筆記動作取得については以前に提案した 9 軸 IMU と深度センサを用いる手法 [6] を用いる. 筆跡生成についても今回提案する毛筆モデルとは異なる, 手続きの手法で穂の変形と墨量の減少を考慮した筆跡生成手法 [5] を提案しており, 今回の毛筆モデルに合わせて修正した上で用いる予定である.

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JS19K12290 の助成を受けたものです.

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] Müller M., Heidelberger B., Hennix M., Ratcliff J.: Position Based Dynamics, *Visual Communication and Image Representation*, 18, 2 (2007).
- [3] Umetani N., Shimidt R., Stam J.: Position-based Elastic Rods, *ACM SIGGRAPH Symp. on Computer Animation*, (2014)
- [4] 金山知俊: 仮想書道のための柔軟な穂先をもつ毛筆モデルの提案, *FIT 2018*, (2018/9/20).
- [5] 金山知俊: 墨量の減少によるかすれ表現を可能とする仮想書道のための筆跡生成手法, *FIT 2020*, (2020/9/1).
- [6] 金山知俊, “9 軸 IMU と深度センサを用いた手書き入力デバイスの開発”, *FIT 2021*, (2021/8/27).