

## アニメーションのための布のシミュレーション制御

Controlling Cloth Simulation for CG Animation

福士 竜一<sup>†</sup> 土橋 宜典<sup>‡</sup> 山本 強<sup>‡</sup>北海道大学工学部<sup>†</sup> 北海道大学大学院情報科学研究科<sup>‡</sup>

## 1. はじめに

コンピュータグラフィックス(CG)における布の表現の研究は盛んに行われており、映画やゲームなどの多くの分野で使われている。本研究は、ユーザが指定する位置および形状へ布の動きをコントロールする手法を提案する。本稿では、布を一次元バネモデルとして表現し、二次元空間におけるシミュレーションを行うことで、提案手法の有効性を検討する。提案手法により、布がユーザの意図した位置、形状へコントロールされたアニメーションの生成が可能である。

## 2. 従来研究

CG での布のシミュレーションに関する研究は数多く存在する。多くの手法では、パーティクルモデルを用いて布を表現している[1]。これは、布の縦糸と横糸の交点をパーティクルとし、それぞれの糸に働く力を各パーティクル間の相互作用として計算するものである。また、実際の布の挙動を計測する Kawabata 評価システム等を用いて布の特性を調べ、より本物の布の性質に近い表現を目的とする研究も存在する[2]。しかし、これらの手法では布の形状は様々なパラメータに依存しており、ユーザの指定する形が得られるようこれらのパラメータを調整することは難しい。

本研究では、パーティクルモデルによって表現された布の動きのコントロール法を提案する。なお、本稿では目標形状への完全な一致を目的として制御を行う。

## 3. 提案手法

## 3.1 布のシミュレーション方法

本手法における布のシミュレーション方法を説明する。二次元空間上で布のシミュレーションを行い、一次元バネモデルを用いて布を表現する。そのため、隣接するパーティクル間の相互作用のみを考慮する。図1にこのモ

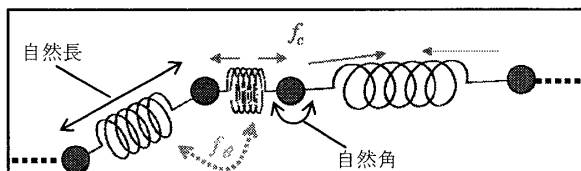


図1:一次元バネモデルの構成

デルの構造を示す。パーティクル間には、以下の三つの力が作用する。すなわち、バネの伸び縮みに対応する伸縮力( $f_c$ )、折れ曲がった部分の角度を自然角( $180^\circ$ )に戻そうとする蝶番力( $f_\theta$ )、そして減衰力である。提案手法では、ばね定数などの性質値には変化を加えることなく、形状の制御を行う。

## 3.2 布の制御方法

本研究では、布を初期位置と初期形状から目標位置および目標形状へと制御することを目指す。提案手法による全体の処理の流れを図2に示す。布の初期形状と目標形状は、ユーザが直接画面上に描くことで指定する(図3参照)。布の位置の制御は、初期速度の設定により行う(3.2.1節)。また、形状の制御は比例制御を利用し、タイムステップごとに、目標形状とのずれに応じた外力を付加することで実現する(3.2.2節)。比例制御における制御係数は最適化処理によって算出する。すなわち、目標到達時の誤差を算出し、この誤差が最小になるように最適な比例制御係数を探索する(3.2.3節)。比例制御係数が最適値となる結果をアニメーションとして出力する。以下で各処理の詳細について説明する。

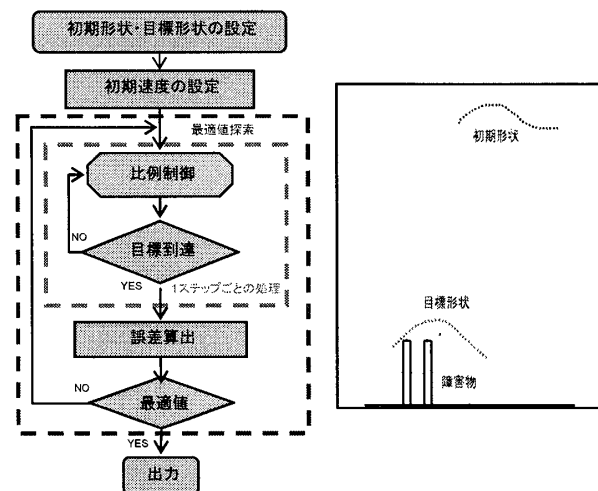


図2:処理の流れ

図3:ユーザによる形状指定

## 3.2.1 初期速度の設定

布を初期位置から目標位置へと自然に移動させるために、空気抵抗を計算して初期速度を決定する。空気抵抗を考慮した場合、初期座標( $x_0, y_0$ )から目標座標( $x, y$ )に向けて布を移動させるための初期速度( $v_{x0}, v_{y0}$ )は次式によって与えられる。

$$v_{x0} = \frac{k(x - x_0)}{m(1 - \exp(-kt_0/m))} \quad (1)$$

$$v_{y0} = \frac{1}{(1 - \exp(-kt_0/m))} \left\{ \frac{k(y - y_0)}{m} - \frac{mg}{k}(1 - \exp(-kt_0/m)) + g t_0 \right\} \quad (2)$$

Controlling Cloth Simulation for CG Animation

<sup>†</sup> Ryuichi FUKUSHI: Faculty of Engineering, Hokkaido University<sup>‡</sup> Yoshinori DOBASHI, Tsuyoshi YAMAMOTO: Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

式(1)および式(2)において,  $k$ は空気抵抗係数(ダンパ定数),  $m$ は質量,  $g$ は重力加速度である. また, 到達時間 $t_0$ を調整することで目標位置に達するまでの時間を制御できる. これらの式を, 布を構成する各パーティクルに適用することで目標の位置, 形状への制御が可能となる. しかし, この処理のみでは形状を目標に完全に一致させることは難しい. そこでさらに形状制御の精度を向上させるために, 比例制御および最適化の処理を行う.

### 3.2.2 比例制御

比例制御を行うことで目標形状への高精度な制御を目指す. 比例制御では各タイムステップにおいて布の現在形状と目標形状との差を最小化するように外力を加える(図 4 参照). このとき, 外力は次式のように設定する.

$$f_{(x,y)} = \alpha(x - x_{(t)} - x_c, y - y_{(t)} - y_c) \quad (3)$$

外力 $f$ は, パーティクルごとに計算し, 時刻 $t$ における布の各パーティクルの現在座標 $(x_{(t)}, y_{(t)})$ と目標座標 $(x, y)$ との差が大きいくほど, そのパーティクルに加わる外力は強くなる. 式(3)において,  $(x_c, y_c)$ は, 現在形状と目標形状との重心位置の差分を表しており, これにより, 図 4 に示すようにパーティクルの形状のずれを求めることができる. また,  $\alpha$ は制御係数であり,  $\alpha$ の値により各ステップに加わる外力の大きさが変化する. 次節で述べる $\alpha$ の最適化処理により, 誤差が最小になる最適な制御係数を決定する.

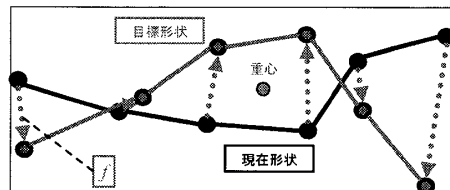


図 4: 比例制御 (両形状の重心を一致させる)

### 3.2.3 制御係数 $\alpha$ の最適化

3.2.2 節での比例制御では, 制御係数  $\alpha$  に応じて制御結果が変化する. そこで, より目標形状に近い結果を目指し, 誤差の最小化を行う. 誤差は, 布の最終形状(結果)とユーザの指定した目標形状の各パーティクル位置の差の平均とする. 我々の実験では, 図 5 に示すように,  $\alpha$  と誤差との関係は二次関数のような滑らかな曲線となる場合が多いことがわかった. そこで, 誤差が最小となる点(図 5: 青円)を最急降下法[3]により求める. すなわち, 制御パラメータ  $\alpha$  を変化させたシミュレーションを繰り返し, 最適解を探索する.

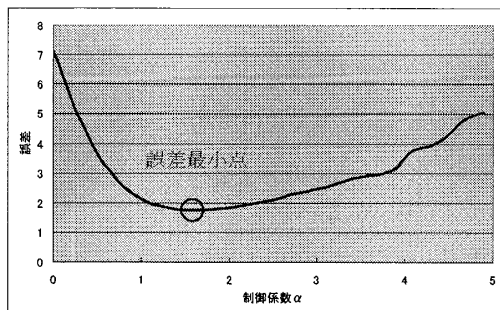


図 5:  $\alpha$  と誤差の関係

## 4. 実験結果

提案手法を適用した結果を図 6, 図 7 および図 8 に示す. 実験環境は CPU が Intel Core2 Duo E7500 (2.93GHz × 2) で, メモリ 2GB となっている. 図 6, 図 7 はパーティクル数が 32 で, 図 8 は 64 である. また図 8 は, 他の 2 つよりもパーティクルの間隔を短くすることで, きめ細かい布を表現している.

図 6 は 3.2.1 節で述べた初期速度の設定のみによって得られた結果である. 布の重心および大よその形状は一致しているが, 布の両端に誤差が見られる. 一方, 図 7 では, 3.2.2 節と 3.2.3 節で述べた最適な比例制御が行われており, 結果の布がほぼ目標形状と一致しているのがわかる. 図 6 では制御のための計算時間は不要であるが, 図 7 では最適化処理に約 23 秒かかる. また, 図 8 では, パーティクル数が図 7 の 2 倍であるため, 最適化処理の時間は約 51 秒であった.

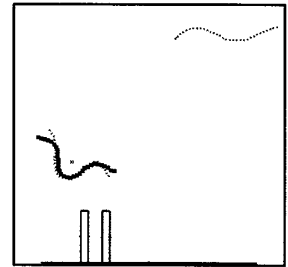


図 6: 初期速度の設定のみ

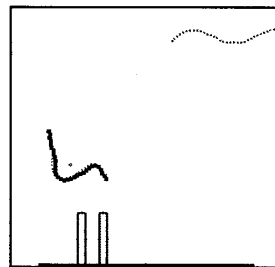


図 7: 比例制御 1 (最適  $\alpha$ )

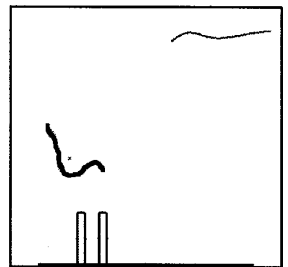


図 8: 比例制御 2 (最適  $\alpha$ )

## 5. まとめと今後の課題

本稿では, 二次元空間における一次元バネモデルでの布の制御法を提案した. 本提案手法により, ユーザの指定する形状へと布をコントロールすることが可能となった. 今後は三次元空間での二次元パーティクルモデルの制御へと拡張していく. 二次元パーティクルモデルは, 一次元バネモデルでは考慮していなかった要素が存在するため, それぞれについて比例制御が必要となる. そのため, 制御係数も増加し, それぞれの最適解を探索する必要があり, 計算時間が増大する. 今後は, 最適化処理の高速化が必要となる.

## 参考文献

- [1] Kwang-Jin Choi, Hyeong-Seok Ko: Stable but Responsive Cloth, in *Proceedings of SIGGRAPH'02*, pp. 604-611 (2002)
- [2] David E. Breen, Donald H. House, Michael J. Wozny: Predicting the Drape of Woven Cloth Using Interacting Particles, in *Proceedings of SIGGRAPH'94*, pp. 365-372 (1994).
- [3] 戸川 隼人: シリーズ 新しい応用の数学 17 共役勾配法, 教育出版株式会社 (1977)