

改良 Mass-Spring モデルに基づく布の動的シミュレーション

Dynamic 3D Simulation of Fabric Based on Improved Mass-Spring Model

羅 軍[†]、味八木 崇[‡]、山崎 俊彦[‡]、相澤 清晴[‡]

ぐんら、たかしみやき、としひこ やまさき、きよはる あいざわ

1. はじめに

コンピューターで高速かつリアルティーのある布の動的変形シミュレーションを行う研究は非常に重要で、また応用分野も広い。例えば、ゲームや映画などのCGアニメーションへの応用やアパレルCADへの応用などが考えられる。これまでに布のシミュレーション手法は数多く開発されてきたが^{[1][2]}、演算の高速化、リアルティーの向上が課題となっている。

本研究では、繊維素材の力学特性に基づいて改善 Mass-Spring モデルを構築し、布地の運動方程式を導く。それから、時間差分法により、変形形状を数値解析的に導く簡単なアルゴリズムを提案する。さらに、提案したアルゴリズムを利用して、動的な変形形状を計算した例を示す。

2. 動的モデルの構築

Mass-Spring モデルとは、Fig. 1 に示すように布をいくつかの質点、バネに離散化した格子構造で表現したモデルである。布は $m \times n$ 個の格子点から構成される。格子点は質点であり、質点間は Fig. 1 に示す三種類のバネで連結されている。

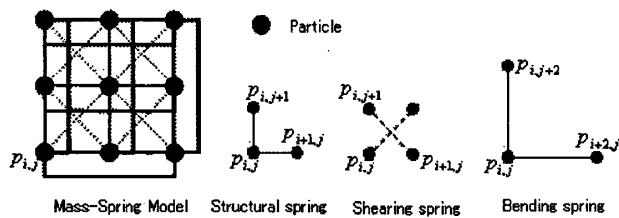


Fig. 1 Mass-Spring model and 3 types of springs

空間内に座標系 $0 - xyz$ を設定する。時刻 t における質点 $p_{i,j}$ の位置ベクトルを $\mathbf{S}(p_{i,j}, t) = [x_{i,j,t}, y_{i,j,t}, z_{i,j,t}]$ ($i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$) と表す。今後簡単に \mathbf{S} (或いは、時刻 t を明らかにする時 \mathbf{S}_t) と記す。そして、Newton の第二法則により、次の運動方程式が成立つ。

$$m \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial t^2} = \mathbf{F}_{\text{ext}}(\mathbf{S}, t) + \mathbf{F}_{\text{int}}(\mathbf{S}, t) \quad (1)$$

ここで m は質点の質量であり、ベクトル \mathbf{F}_{ext} と \mathbf{F}_{int} はそれぞれ質点に働く外力と内力である。位置ベクトル \mathbf{S} を求めることが我々の目的である。

内力 \mathbf{F}_{int} については、弾性力のみが唯一の考慮しなければならない内力である。 \mathbf{F}_{int} は Hook 法則により次式で計算できる。

$$\mathbf{F}_{\text{int}} = \sum_{(i,k) \in R} k_e (\|\overrightarrow{p_{i,j} p_{l,k}}\| - \|\overrightarrow{p_{i,j} p_{l,k}}\|_0) \frac{\overrightarrow{p_{i,j} p_{l,k}}}{\|\overrightarrow{p_{i,j} p_{l,k}}\|_0}$$

[†] 中国・江南大学

[‡] 東京大学新領域創成科学研究所

ここで、 k_e はバネ定数であり、 R は $p_{i,j}$ と隣接する質点の集合、 $\|\overrightarrow{p_{i,j} p_{l,k}}\|_0$ は質点 $p_{i,j}$ と質点 $p_{l,k}$ とが繋がるバネの自然長である。ここで、従来のシミュレーション方法との違いは、 k_e はバネの種類によって変化し、さらに、同じバネの弾性係数もバネの変形程度につれて値が異なる点である、Structural springを例とすると、繊維の引張り特性はFig. 2 に示すように変化する^[3]。

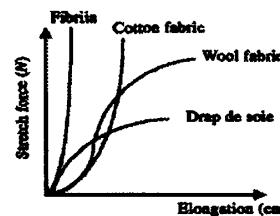


Fig. 2 Stretching curves of the fabrics made of natural fiber

外力は主として重力、風力、減衰力及び衝突力があるが、本論文では複雑な衝突力を除く重力、風力と減衰力を考慮した。ここで、重力加速度は \mathbf{g} で表すと、質点に働く重力は次式で計算する。

$$\mathbf{F}_{\text{gr}} = mg$$

減衰力は質点の運動速度に関係があり、運動速度が余り速くない時、一般的に次式で計算できる。

$$\mathbf{F}_{\text{damp}} = -k_d \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} \quad k_d : \text{減衰係数}$$

布の動的変形における風の影響は複雑であるが、ここで次の単純なモデルを利用して、風のシミュレーションを行う。

$$\mathbf{F}_{\text{wind}} = [A \sin(\omega t + \phi) + \epsilon] \mathbf{d}$$

ここで A は風力の最大強さ、 ω は風力強さの変動周期、 ϕ は初めの位相角、 ϵ はガウスノイズ、 \mathbf{d} は風力の単位方向である。

以上の分析により、(1)式は次式で表すことができる。

$$m \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial t^2} + k_d \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} = mg + \mathbf{F}_{\text{wind}} + \mathbf{F}_{\text{int}} \quad (2)$$

3. 動的変形のシミュレーション

前節で求めた運動方程式(2)を基にして、布の動的な形状変形を計算する。まず時間差分法を利用して、運動方程式(2)を簡単化する。時間差分法により、

$$\frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial t^2} = \frac{1}{\Delta t^2} (\mathbf{S}_{t+\Delta t} - 2\mathbf{S}_t + \mathbf{S}_{t-\Delta t}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} = \frac{1}{2\Delta t} (\mathbf{S}_{t+\Delta t} - \mathbf{S}_{t-\Delta t}) \quad (4)$$

ここで Δt はできる限り短い時間間隔である。即ち $\Delta t \rightarrow 0$ である。

もし $B = m \frac{1}{\Delta t^2}$ 、 $C = k_d \frac{1}{2\Delta t}$ とすると、(3)と(4)式を

(2)式に代入して整理でき、次式が得られる。

$$(B+C)\mathbf{S}_{t+\Delta t} = 2BS_t - (B-C)\mathbf{S}_{t-\Delta t} + mg + \mathbf{F}_{wind} + \mathbf{F}_{int} \quad (5)$$

又、時刻 $t=0$ における質点の位置を \mathbf{S}_0 とし、初期状態で布は静止しているとすると、次の式が成り立つ。

$$\mathbf{S}_{-\Delta t} = \mathbf{S}_0, \quad \frac{\partial \mathbf{S}}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial^2 \mathbf{S}}{\partial t^2} \Big|_{t=0} = 0 \quad (6)$$

方程式(5)と初期条件(6)により、次の時刻 $t+\Delta t$ に質点の位置ベクトル $\mathbf{S}_{t+\Delta t}$ を求めることができる。

4. シミュレーション結果と考察

(5)式の有効性を確認するため、シミュレーション実験を行った。Fig. 3 は、 10×10 質点から構成された布のシミュレーション結果である。

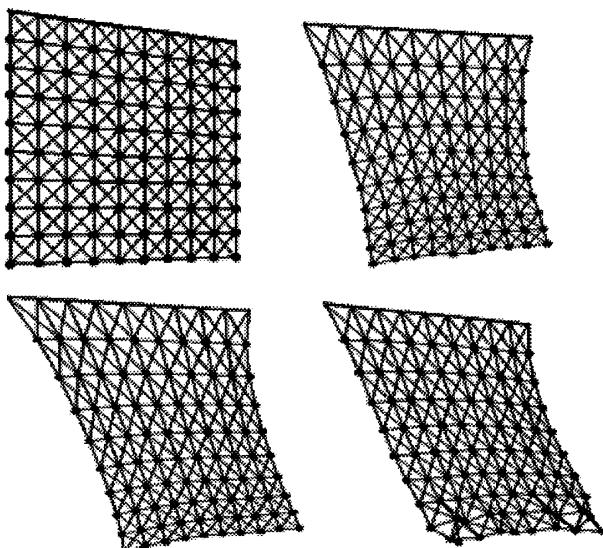


Fig. 3 The simulation effect of hanging textile

Mass-Spring モデルにおいては、バネが伸びすぎる(superalastic)問題が発生する。従来の解決方法は Fig. 4-(a)に示すように一つの限界点を設置し、限界点内でモデルに採用されたバネの延長量はバネの実際延長に等しく、限界点を超えると、これ以降のバネの長さはそれ以上変化しない。これは繊維の実際の物理的性質とは異なる。また調整曲線も滑らかでなくなる、リアリティーが低下する。本論文では Fig. 4-(b)に示すように滑らかな曲線をバネの延長変化曲線として採用した。

曲線の数学形式は次式で表す。

$$y = 0.06L_0 \arctan\left(\frac{5\pi x}{L_0}\right) \quad L_0 : \text{バネの自然長さ}$$

演算効率は主に二つの要因より決められる、一つは質

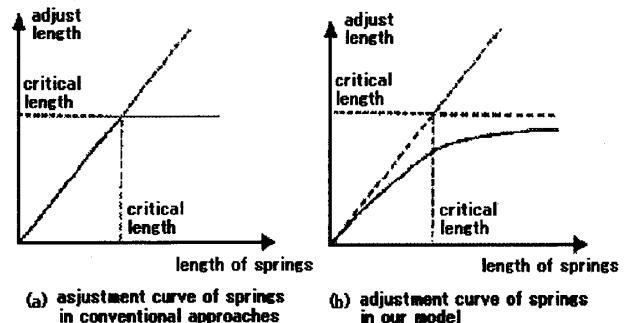


Fig. 4 Solution of the problem about super-elongated spring

点の個数である。質点は余り少なくなると、リアリティーが低下する。一方、質点数が多ければ、計算時間が急激に増加する。だから、質点の数はユーザが両者のトレードオフを考慮して決定することが望ましい。もう一つ要因が時間ステップ Δt である。時間差分法に基づいてシステムを求めるため、時間ステップはできるだけ短い方が良い。但し、 Δt が短すぎると演算速度が下がるようになる。そのため、提案手法では自己適応時間ステップ方法を採用した。

5. まとめ

本研究では、繊維素材の力学特性を考慮して改良 Mass-Spring モデルを構築した。さらに、簡易な風力シミュレーションモデルと時間差分法に基づいて簡単なアルゴリズムを提案し、そのシミュレーションの結果を示した。今後は、本論文のモデルに残る問題点を解決するとともに、実際の布との変形挙動の比較ができるように、モデル中のパラメータの同定について検討する予定である。

参考文献

- [1] Jerry Weil, "The Synthesis of Cloth Objects", SIGGRAPH86, pp.49-54, 1986.
- [2] Xavier Provot, "Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior", Graphics Interface95, pp.147-154, 1995.
- [3] Nadia Magnenat Thalmann, Martin Courchesne, Pascal Volino, "Simulating Deformable Clothes for Fashion Industry", VSMM95, pp.58-66, 1995.
- [4] Bernhard Eberhardt, Andreas Weber, Wolfgang Strasser, A Fast, Flexible, "Particle-System Model for Cloth Draping", Computer Graphics in Textile and Apparel, pp.52-59, 1996.
- [5] David Baraff, Andrew Witkin, "Large Steps in Cloth Simulation", SIGGRAPH98, pp.133-144, 1999.
- [6] Kwang-Jin Choi, Hyeong-Seok Ko, "Stable but Responsive Cloth", SIGGRAPH02, pp.604-611, 2002.
- [7] 今岡春樹, 岡部彦秀, 赤見仁, 渋谷惇夫, 相坂登, 松田亮治, "二次元を例とした変形予測法", 織学誌, Vol.44, No.5, pp.229-237, 1988.
- [8] 阪口嘉之, 美濃導彦, 池田克夫, "仮想服飾環境動的変形可能な布のための数値計算法", 信学論, Vol.J77-D-II, No.5, pp.912-921, 1994.
- [9] Yao M, Zhou JF, Huang SZ, Shao LH, An RF, Fan DX, Textile Materials Science, 2nd ed., Beijing: Textile Industry Press, pp.518-532, 1993.