

《小特集》

CGにおける布のシミュレーション

太田高志*

ABSTRACT Use of physically based model and simulation technique is now widely accepted as the method for creating a realistic cloth figure and motion, which has been regarded one of the most difficult subjects for CG. Other than the designing of a model and numerical approach, there are subjects to be considered in order to complete a cloth simulation, such like collision detection and constraints. We review in this paper the general approach of cloth simulation, and explain briefly on each aspect of the entire process, with sample images.

1. CGと布

かつて、無機物やロボットなどいわゆる「硬いもの」のみで画面が構成されていたころとは異なり、CGに「柔らかいもの」である人間が非常にリアルに登場することは珍しいことでは無くなった。人間が登場したことによって、その衣服が要求されるのは当然の帰結であるが、衣服にも人間のモデルに対応したリアルさが要求されるのもまた当然である。CGにおける布の表現として、初めは、静止画としてカーテンやテーブルクロス等を表現することなどが試みられたが¹⁾、上記のような背景で現在ではリアルな衣服が実現されてきている。特に最近ではCGはアニメーションとして作成されることが多く、布の表現も当然ながらモーションを意識したものが殆どである。テレビゲームなどでも、ゲーム中のキャラクタの動きに合わせてリアルタイムに衣服がひらめくような例が多く見られるようになってきているが、そうした状況に合わせて、商用のシミュレーションソフトウェアも現れているのが現状である。

布をCGで表現するための課題はその形状をいかに生成するかということにあるが、布の形状は細かなしわや折り目の存在で非常に複雑なものとなるため、デザイナーが自身の感性に従って形状を創っていくのには限界があり、測定などの手段も困難である。そうしたなかで、適当な拘束条件の設定や、エネルギー関数の最適化によるものなど様々な手法が考案されてきた経緯があるが、モーションを考慮に入れたとき物理的

なモデルによるシミュレーションが一般的なアプローチとなるのは自然であろう²⁾。たとえ静止状態の形状であっても、それが折りたたまれ方のような変形の履歴で決定されることを考えると、エネルギー関数の最適化のようなアプローチには限界があるように思われる。ところで、物理的シミュレーションのアプローチを採用するとき、モデル化と計算技法の構成などは一般の科学シミュレーションと変わりはない。しかしながら、導出される布がCGの特定のシーン(Scene)で利用されるということを考えた場合、単に単独の布地の変形を解析するのとは異なり、背景にある他の物体との関連や条件の設定とあわせた、システムとしての構成を考慮しなければならない。

本稿では、CGのための利用を念頭においたときに考慮すべき要素との関連を見ながら、全体的なシミュレーションプロセスの構成と個々の要素の実施例を示して、布のシミュレーションについて概観していきたい。

2. シミュレーションの概要

上記のようにCGでの利用を考えたとき布のシミュレーションに要求される項目にはどのようなものがあるだろうか？まず、布の計算モデルそのものを設定しなくてはならない。物理モデルとしてもいくつかのものが考案されそれぞれに特徴があるが、布を何らかのモデルで近似しその運動方程式を時間進行的に解くという原理は共通である。モデルとしては、有限要素法を用いたものや³⁾、パーティクル(質点)をバネでリンクしたもの⁴⁾が多く用いられている。運動方程式には通常、重力の影響が取り入れられるが、例えば風になびく旗などを作成するには風の影響も外力として取り入れなければならない。布のシミュレーションでは

Cloth Simulation for CG. By Takashi Ohta (Tokyo Research Laboratory, IBM Japan).

* 日本アイ・ビー・エム (株) 東京基礎研究所

そのようなモデルの構築に加えて、他の物体との接触や関連、布の部分間の衝突を考慮しなければならない。これは、モデルの運動方程式の計算とは独立して行われる。衣服を扱う場合には、いかに体に着せかけるかという問題も解決しなければならない。初めから人体のまわりにCADでおおまかな衣服の形状を作成する場合もあれば、型紙を用意し、それらを体のまわりで合わせるようにして最終的に衣服形状を形成させる手法もある。具体的なCGのSceneを作成するには、以上のような要素を統合してシステム化する必要がある。

3. 物理モデル

布をどのようなモデルで表現するかという選択は、どの程度「本物らしい」ことを追求するか、つまり、布の材質による特質を忠実に再現したいのか、それとも単に「本物らしい」絵を作ればいいのかということによって異なってくる。CGのアニメーション作成という利用を考えた場合には後者の条件が強くなるであろう。すなわち、モデルとしての物理的な厳格さはあまり追求せず、むしろ、計算の簡易さやシステム全体の機能が重要となる。

もっとも一般的なアプローチは、バネ-質点系によるモデルであろう。これは、**図1**のように、布を格子状の質点で構成し、質点間をバネのような弾性体で結んだものである。このモデルは上述のように布の物理特性を忠実に再現するものではないが、ある程度、布のような挙動、形状を表現することが可能である。

このようなモデルに対して、各格子点についての運動方程式を、各格子点に対するエネルギーから以下のラグランジュ方程式を構成することで導出することが出来る。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\vec{r}}} - \frac{\partial L}{\partial \vec{r}} = F(r, t) \quad (1)$$

ここで、 L はラグランジアン、 \vec{r} は位置ベクトル、 F は

外力項である。具体的には以下のようなエネルギー関数を要素としてラグランジアンを構成する。まず、バネの伸びによる位置エネルギーは、

$$E_p = \sum_{i,j} k_{i,j} (|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - l_{i,j})^2 \quad (2)$$

と表すことが出来る。ここで、 $k_{i,j}$ 、 $l_{i,j}$ は、バネで繋がれている質点の組を i と j のインデックスで表したときのバネ係数と基準長である。同様に、曲げに対する剛性エネルギーに対して以下のような関数を設定することが出来る。

$$E_c = \sum_n C_n \left| \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial u^2} \right|^2 \quad (3)$$

これを、繊維の縦と横のそれぞれの方向に対して用意する。 C_n は剛性係数であり、 u は布の平面上の座標軸である。さらに、ひねりに対する曲げ剛性を、

$$E_t = \sum_n C_t \left| \frac{\partial^2 \vec{r}}{\partial u \partial v} \right|^2 \quad (4)$$

のように用意して、最終的にラグランジアンが、 $L = E_p + E_c_u + E_c_v + E_t$ と与えられる。式(1)に戻って、外力項としては通常、重力を考慮するが、風などを取り込むことも可能である。ここから導出した方程式を数値的に解くにあたっては、挙動を安定させるために適当な拡散項を加える。方程式を時間進行的に解くには、単純なオイラー前進解法を用いることも出来るが、より安定性を高め、大きな時間ステップを可能とするにはルンゲ・クッタや陰解法を利用する⁹⁾。

ところで、モデルとしてここでは正方格子のような配置を考えたが、上記のようなアプローチで運動方程式を導出することにおいて正方格子である必要性は無い。むしろ、このままでは、格子の斜め方向の引っ張りに弱く、布というよりはゴム膜のような特性となってしまうことが分る。それを補正するためには、斜め方向にもバネを配置する(**図2**)ことで、より布に近い変形を得ることが出来る。硬さを増すために、さら

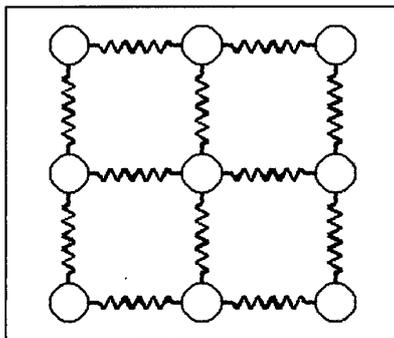


図1 バネ-質点モデル

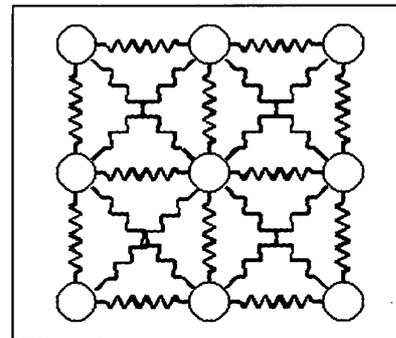


図2 バネ-質点モデル (2)

には1つ置き格子点を結ぶバネを配置する、等のアプローチも考えられる。また、後述のように、衣服の型紙などを対象とするには、そもそも三角形を基本要素としてモデル化するほうが任意の形状を構成しやすい。いずれにせよ、必要に応じたモデル化を行い、そのモデルに合わせた物理量の導出により運動方程式を構成し、数値的な解法と合わせることで、布自身の変形シミュレーションが準備される。

この時点で、例えば以下のような計算が可能となる。図3は、外力として風を考慮して旗の挙動をシミュレートしたものである⁹⁾。本来であれば、旗によって風自体も影響を受けるが、このようなCGアニメーションの作成では、そういった場を作るのに際して旗と流体(空気)を連成させた解析を行うことはしない。風は、旗の動きとは独立して、一定、もしくはあらかじめ設定された挙動によって与えられるのが普通である。図4は個別のエネルギーにおける物理定数をパラメータとすることによって、布の特質を変えたものである⁹⁾。図中の布は三つの角で吊り下げられており、残りの一点が自由に垂れ下がっている。(a)を標準の設定とすると、(b)は伸びに対する剛性が弱くなっていて、よりゴムのような質感になっている。(c)は曲げ



図3 風になびく旗

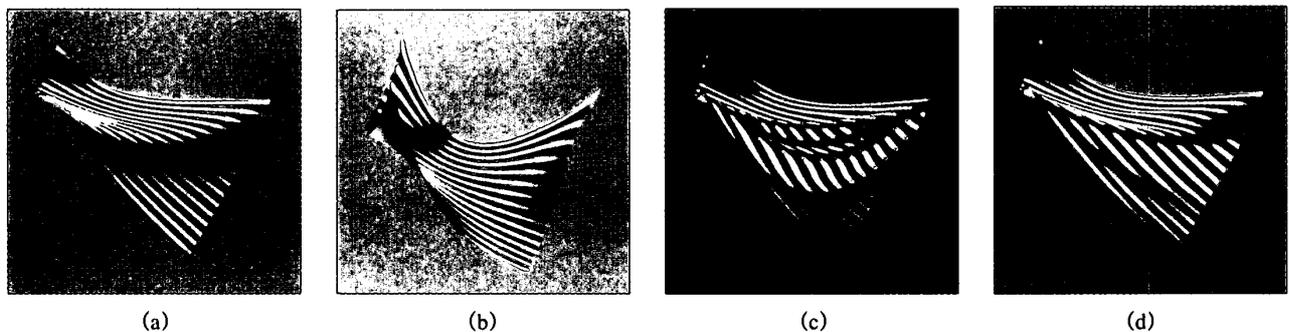


図4 パラメータ変更による物理特性の変化

に対する剛性が弱くなっており、そのため余分なしわが形成されている。(d)は曲げに対する剛性が一方向のみ弱くなっている。そのため、(c)に比べてしわの形成が異なったものとなっている。

4. 衝突検証

さて、前節では布自体のモデル化について述べたが、それだけでは、例えばテーブルクロスのような絵を作ることは出来ない。上記のモデルにはテーブルに対する配慮がなされていないため、布はテーブルと関係なしに動作が計算されるからである。テーブルの上から布がかぶさるような状況では、布はテーブルがそこにはないのと同じようにすり抜けていくだけである。さらには地面もすり抜けていってしまう。テーブルとの関係を正しくシミュレートするには、テーブルとの接触を検出してそれに対応するような仕組みが設けられていなければならない。接触の検出は、テーブル等の物体を構成するポリゴンと、布を構成するポリゴンとの干渉を検出することによって実現される。

ポリゴン間の干渉は、それぞれのポリゴンを三角形の集合とみなすことにより、三角形同士の干渉問題として処理出来る。三角形同士の干渉は、一方の三角形を含む平面の方程式を三頂点の座標から導出し、他方の三角形の三辺を含む線分とその平面の交点を求めることによって判断出来る。しかしこの方法は両方の三角形が静止した状態を仮定している。布が物体にかかるような状況を想定したとき、移動を考慮した検出をしなければならない。図5に示すように、三角形Aが、別の三角形Bを通り抜けるように移動する状況を考えて見よう。 $\bar{p}_A, \bar{p}_A^{n+1}$ を三角形Aの頂点の連続した時間ステップにおける位置とする。三角形Bの各頂点の位置をそれぞれ、 $\bar{p}_1, \bar{p}_2, \bar{p}_3$ とすると、Aの頂点が三角形Bを通過したかどうかは以下の式により判断することが出来る⁷⁾。

$$\bar{P}_A^n + (\bar{P}_A^{n+1} - \bar{P}_A^n)t = \bar{P}_0 + (\bar{P}_1 - \bar{P}_0)u + (\bar{P}_2 - \bar{P}_0)v \quad (5)$$

この式で、 $0 \leq t \leq 1.0$, $0 \leq u, v$, かつ $u+v \leq 1.0$, となる解が見つかる場合は、頂点 P_A がこの時間内に三角形 B を通過したことを示す。この検査を三角形 A の全頂点について適用することで、A と B の干渉を検出することが出来る。

上記の他の物体との衝突検出は、CG における物理アニメーションでは布に限らない一般的な問題である。しかしながら布の場合は、他の物体との衝突以外に、自身の部分間での衝突にも注意を払わなければならない。そうでなければ、布が非常に大きく折れ曲がったときなど、一部が他の部分を突き抜けるような事態になってしまう。従って、布を構成する全三角形同士の組み合わせについても、上記のような衝突検出を実行しなければならない。また、布の部分同士を考えるとときには両者とも移動していることを考慮しなければならない。これは、上記の手法を拡張した以下の式を扱うことで判定される。

$$\begin{aligned} \bar{P} + \bar{V}t = \bar{P}_0 + \bar{V}_0t + ((\bar{P}_1 - \bar{P}_0) + (\bar{V}_1 - \bar{V}_0)t)u \\ + ((\bar{P}_2 - \bar{P}_0) + (\bar{V}_2 - \bar{V}_0)t)v \end{aligned} \quad (6)$$

各記号の意味は、前述の検出手法における三角形の方も移動している状況を考え、 \bar{V}_i を各頂点の移動ベクトルとしている。この場合も、パラメータ t, u, v に対して、前述の手法と同じ条件が満たされるときに干渉が検出される。

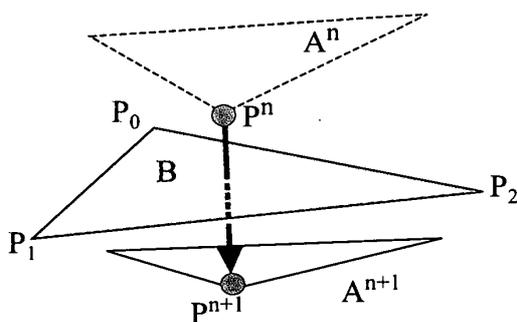


図5 三角形による干渉検出

ところで以上のような計算を、布を構成する全三角形と物体を構成する全ポリゴンの間、また、布を構成する全三角形同士の組み合わせに、毎時間ステップ適用するのは物理計算以上に計算コストがかかる。そのため、空間をボクセル分割するなどして、空間的に近いもの同士のみ上記の検査を適用するような処理が必要である。しかしながら、目的に応じてそれほど高い精度の必要が無いような場合、もっと簡便な方法をとることも出来る。例えば、三角形の頂点に適当な大きさの球を想定し、球同士の干渉検出によって処理を行うことも出来る。この場合、実際に接触していない場合でも接触したと判定される場合があるが、格子の細かさや球の大きさを調整することによって、適当な効果を得ることが出来るだろう。球同士の判定は遥かに計算コストが少なく済む。いずれかの方法で衝突が検出された後には、その要素（質点）が適切な動作を取るよう設定し、挙動が自然に見えるような工夫が必要である。例えば、物体と接触した場合には平面に沿って滑るようにしたり、布同士が接触したときには自然な反発を与えるようにしたりするのである。これらについては次節で説明する。

図6、図7に衝突検出を付加した上での計算例を示す。いずれも、布を物体の上方から被せるようにして計算を行ったものであるが、それぞれテーブルや椅子と接触するのに合わせて折れ曲がっていき、それに伴った折り目を形成して自然な形状を作り出している。図7の場合のように布の折り目が非常に大きなものとなるときには、布の部分間の衝突検出も重要である。

5. 制約条件

前節で触れたように、他の物体との接触を検出した場合には、布の振る舞いが自然に見えるような工夫を設定しなければならない。例えば、先に示したテーブルクロスの場合には、テーブルの上部と接触が検出された部分はテーブルを突き抜ける前の位置に留まって

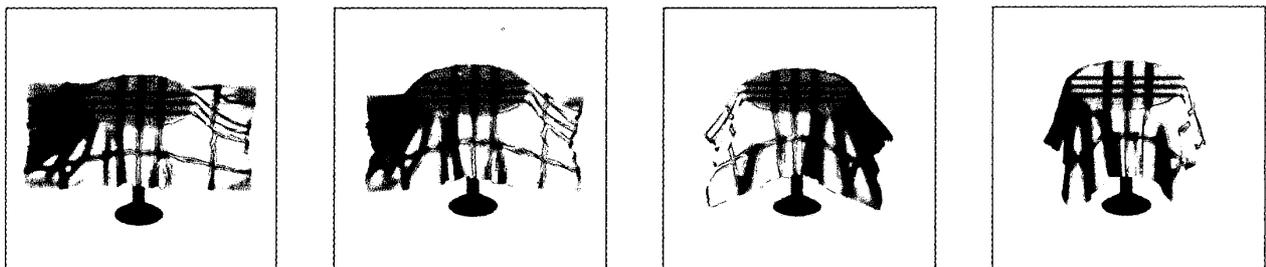


図6 丸テーブルにかかるテーブルクロス

いることが要求される。また、布が被さる対象がテーブルではなく椅子のような場合には、接触した表面が必ずしも水平ではないため、その部分では布が滑り落ちるような挙動が要求される場合もある。これらは衝突を検出すれば自然に行われるわけではなく、個々の質点の動作として与えなければならない。

具体的な例を挙げると、例えばある質点とテーブル等を構成する三角形の一つとの衝突が検出されたとしよう。図8は、この状況を三角形の表面が図と垂直となるように見ているところを示す。この質点が三角形の平面を滑るように移動させるには、図のように、本来の移動距離を平面に投影し、それに幾分かの摩擦を考慮したものを移動ベクトルとして与えればよい。他のアプローチとして、質点を大きくするという手法が提案されている⁹⁾。例えばテーブル上面の場合では、接触を検出した点の質量を非常に大きく設定すれば良い。この手法は具体的には以下のように適用される。質点の運動方程式は、 $\ddot{x}_i = \frac{1}{m_i} \vec{f}_i$ のように与えられる。ここで、質量の項、 $1/m_i$ を0、すなわち質量 m_i を無限大、と操作することによって質点の移動を制御することが出来るというのがアイデアである。このアプローチによって質点の移動を平面上に制約するのは以下のようにする。質量を以下のように個々の運動成分毎に適用

するような形式を考えて見よう。

$$\ddot{x}_i = \begin{pmatrix} 1/m_i & 0 & 0 \\ 0 & 1/m_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \vec{f}_i \quad (6)$$

このようにすると、この質点の運動は x-y 平面に限定されることになる。これを拡張して、任意の平面に関してその法線ベクトルを \vec{p} としたとき、質量項を含んだ行列を、 $1/m_i(\mathbf{I}-\vec{p}\vec{p}^T)$ のように構成することで、質点の運動をその平面に限定することが出来る。(これは、 $(\mathbf{I}-\vec{p}\vec{p}^T)\vec{p} = \mathbf{0}$ となることより、ベクトル \vec{p} の成分の力がキャンセルされるためである。)

ここでは二つ程具体的なアプローチを紹介したが、他にも色々な工夫を考えることが出来るであろう。このような制限を、前節の衝突検出などと適切に組み合わせることで、より自然な動きを創り出すことが出来るのである。

6. 衣服の構成

さて、ここまでのところで、布の挙動を創り出すという意味ではほぼ実現出来るようになったと言えるだろう。では、この素材を使って衣服とするにはどうすればいいだろうか。衣服は単なる平面ではなく、三次元的なトポロジーからなっている。この形状を作る手法としては、CADなどでそのような形状を作成するか、現実と同じように型紙を組み合わせるということなどが考えられる。ところで、そのようなアプローチは人間のモデルと関連して適用出来なければならない。CADで形状を作成する場合には人間のモデルを中心においた上で、その周りを被うようにして作れるようなインターフェースが必要になるだろうし、型紙によるアプローチでは、個々の型紙を「縫い」合わせて、人体に着せ掛ける仕組みを用意しなければならない。

ここでは型紙を用いたアプローチの一例を紹介する。型紙は、現実の衣服の型紙と同じように用意することが出来る。ここで必要となるのは、それらの型紙を「縫い」合わせるための仕組みである。簡単なアプローチとしては、型紙の縫い合わせ部分を構成する質点の数を同じにし、対応する質点同士が引き合うように設定して、最終的には同一の点として振舞うように設定すればよい。このアプローチでは、全体の処理の流れは以下ようになる。

- ◆ 型紙の作成
- ◆ 型紙の体の周辺への配置
- ◆ 対応する部分の「縫い合わせ」
- ◆ 通常の計算による変形



図7 椅子にかかる布

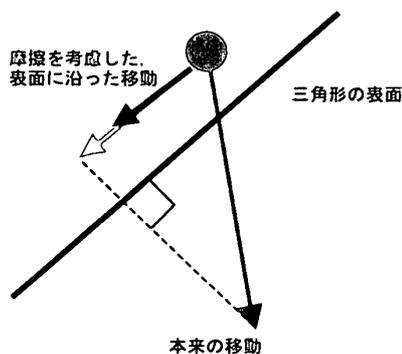


図8 物体表面に沿った移動

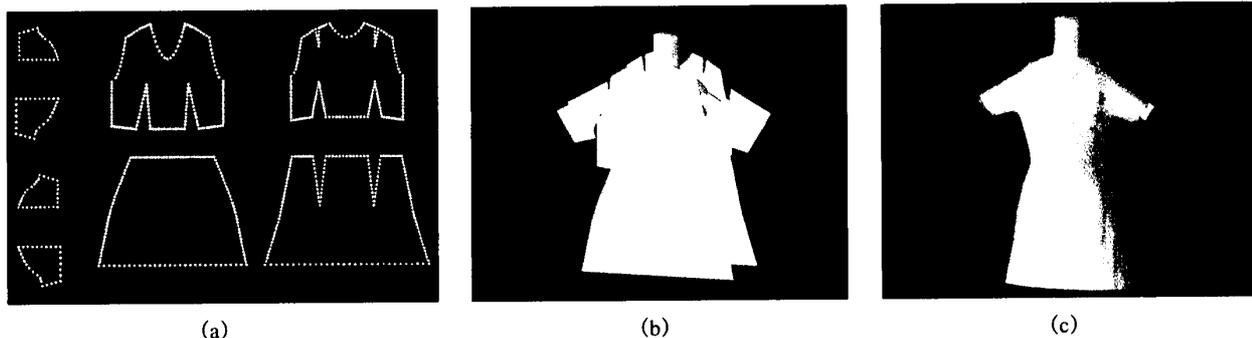


図9 型紙からの衣服の構成

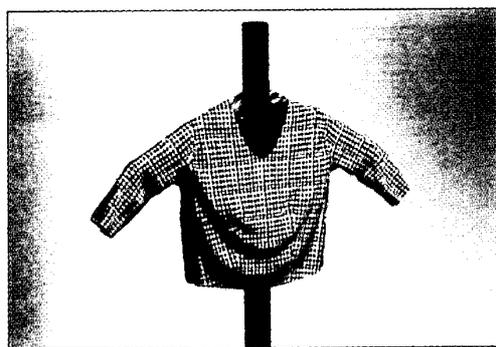


図10 衣服の作成例 (1)



図11 衣服の作成例 (2)

型紙の体の周辺への配置は、「縫い合わされる部分が引き合って変形していくときに、衣服が体にうまく着せかかる」ように配置するのである(図9b参照)。それらが縫い合わされるまでは、重力などの考慮無しに、単に縫い合わされる辺上にある質点の強制移動に従った変形だけが行われるようにする。縫い合わせが終了した後は、重力等の考慮のもとに通常の布のシミュレーションを行うことによって、体の形状に従った自然な形が得られる(図10,11)。

7. CGのためのシミュレーション

本稿では、布のシミュレーションについて、特にCGへの用途を考えたときに必要な要素を概観する形で説明した。シミュレーションの核となるのは物理モデルとそれを解く数値的な手法の設定であるが、衝突検出や型紙の縫い合わせ、等、システムとして布のシミュレーションを成立させるためには他の要素が必要となる。ここでは、個々の要素について、他のアプローチやより詳細な内容を説明するには至らなかったが、CGのための布のシミュレーションを構成する要素がどのようなものかは示せたのではないかと思う。それぞれの具体的なアプローチがどのようなものとなるかは、その用途によって異なる選択となるだろう。例えば、

コンピュータ・ゲームの中でリアルタイムな動きが必要となる場合と、衣服の完成イメージをより忠実に再現するような場合とでは注力する点が大きく異なるはずである。現在では、このような物理シミュレーションを利用した市販の布のモデリングソフトウェアが複数存在しており、実用の技術となっている。

参考文献

- 1) Weil J., : The Synthesis of Cloth Objects, Computer Graphics, 20, No.4, 49/54 (1986)
- 2) TerzoPoulos D., et. al. : Elastically Deformable Models, Computer Graphics, 21, No.4, 205/214 (1987)
- 3) Okabe H., et. al. : Three Dimensional Apparel CAD system, Computer Graphics, 26, No.2, 105/110 (1992)
- 4) Ohta T., : Use of Multiple Representation for Simulating Cloth Shapes and Motions: An Overview, IBM Journal of Research and Development, 39, No.5, 523/530 (1995)
- 5) Baraff D. and WitKin A., : Large Steps in Cloth Simulation, Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), 43/54 (1998)
- 6) 吉上, 鈴木, 白山, 藤井, 大坪: 物理シミュレーションによる布のCGアニメーション表現, 第5回計算工学会論文集, (2000)
- 7) Moore, M. and Wilhelms J. : Collision Detection and Response for Computer Animation, Computer Graphics, 22, No.4, 289/298 (1988)