

仮想服飾環境 PARTY(I)

—動的変形可能な衣服の形状モデラー—

坂口 嘉之

美濃 導彦*

池田 克夫

京都大学工学部情報工学教室

*京都大学工学部高度情報開発実験施設

あらまし 仮想服飾環境 PARTY とは、衣服を着て着飾った自分を望みの状況に写しだす環境を仮想的に計算機内に構築しようとするものである。つまり、人体形状とその動き、衣服を含めた服飾要素及びバックグラウンドとなる環境を物理的な法則に基づいて構築しようとするものである。本論文では、仮想服飾環境について概略を述べた後に、布モデルと衝突計算からなる衣服の形状モデラについて述べる。また、実際のワンピースの型紙と布の物性値を用いて着衣時の衣服の3次元的な形状とその変形過程を計算した。その結果、リアルなしわのある衣服形状が算出できた。

PARTY: Physical Environment of Artificial RealiTY for Dress Simulation(I)
- A dynamically deformable model of dress. -

Yoshiyuki SAKAGUCHI

Michihiko MINOH*

Katsuo IKEDA

Department of Information Science, Faculty of Engineering, Kyoto University

* Integrated Media Environment Experimental Laboratory, Kyoto University

Abstract PARTY(Physical environment of Artificial RealiTY for dress simulation) is a computational environment in which human beings virtually present themselves with desirable dresses and ornaments in a desirable environment. PARTY consists of three components; human models with their movements, dress and ornament models, and environment in which human beings live. These models are based on the physical rules and a computer can calculate a whole three dimensional world, which is visualized by the methods of CG. In this paper, after describing PARTY briefly, we will focus on a dynamically deformable dress model, by which a shape of the dress with a human body is computationally calculated.

1 はじめに

近年、計算機の性能のめざましい向上により、高度なコンピュータ・グラフィックス (CG) の計算が実用的な時間で行えるようになってきた。また、インターフェースのマルチメディア化等でもユーザ・フレンドリーな CG 画像や、アニメーションへの期待は大きい。このように、CG に関しては、シーズとニーズがそろって来つつあると思われる。CG が最も効果を発揮できるのは仮想的な環境の構築である。その中でも特に人間に関連する技術が重要性を増している。人間そのものに関する研究は多く存在するが、それと重要な関係にある衣服をも含めた研究はあまり進んでいない。そこで、筆者らは、衣服を着て着飾った自分を望みの状況に写しだす仮想的な環境 (PARTY) を計算機内に構築する研究を進めている。この研究は、ファッション、アパレル業界等で大きな効果が期待できると同時に、TV 会議や TV 電話での衣服の合成にも利用できる。PARTY では、仮想的な衣服を着た人物が背景とともに現れ、人物が動けば、その動きに沿って衣服も動くダイナミック・シミュレーションを行なう。本論文では、PARTY の中の、動的変形可能な衣服の形状モデラについて述べる。

2 仮想服飾環境 PARTY

筆者らが構築を目指している仮想服飾環境 (PARTY) を図 1 に示す。処理の主な流れは、次のとおりである。

1. コンピュータ・ビジョン (CV) の手法を用いて、視覚 (画像) から必要な情報を抽出し、PARTY の入力情報として使う。
2. PARTY で、仮想環境での衣服の変形形状を計算する。
3. PARTY の出力結果をコンピュータ・グラフィックス (CG) の手法を用いて、情報を視覚 (画像) 化する。

PARTY には、人体形状モデル、環境、服飾要素の 3 種類の構成要素がある。人体形状モデルとは、人体を三角パッチ等で表現した 3 次元形状データである。人体形状モデルには、視覚情報から CV 的な手法で抽出した、人間の動きや顔の表情等の情報を与える。これにより、人体形状モデルは、仮想環境の中で動きを持つことができる。

環境は、人体形状モデルが置かれている背景や回りの要素 (テーブルや椅子等) である。服飾要素は、人体が身につけるものであり、衣服やアクセサリ等の装飾品等である。服飾要素の中の衣服には、布の物理特性や衣服の型紙を与える。これらの構成要素の物理的モデルをもとにして形状をダイナミックに計算し、その結果をレンダリングすることにより得られる画像を視覚情報として人間に提示する。

PARTY の入力には、CV 情報の他に操作を用いることができる。操作者は、操作情報を入力することで自分の

意思を PARTY に伝えることができる。操作の入力には、3 次元ポインティング・デバイス等を用いる。3 次元ポインティング・デバイスに、駆動機構を設けておけば力のフィードバックが利用できる。これにより、そでを引っ張ったり、衣服を摘みあげて身につけるような日常的な行動を仮想空間内でも実現できる。本論文では図 1 で実線

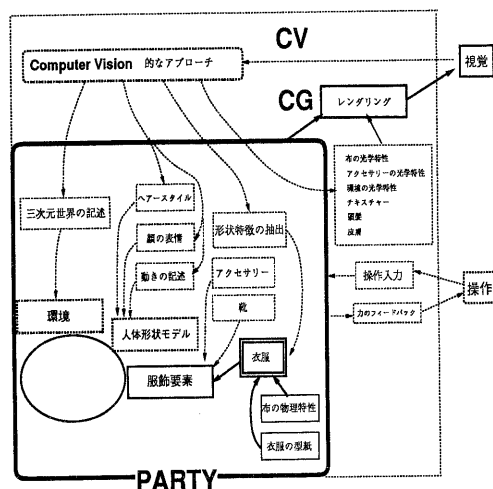


図 1: 仮想服飾環境 (PARTY) の構成

で示した部分、衣服の型紙と布の物理特性から衣服を構築し、人体形状に着装する部分について述べる。計算結果のレンダリングについては、CG の分野で多くの研究があるので本論文では省略する。

3 衣服のモデリング

衣服の計算モデルは、布の計算モデルの拡張であると考えられるので、まず布の計算モデルについて検討する。布の計算モデルは、幾何モデルと物理モデルの 2 つに大別できる。幾何モデルでは、局所的なアフィン変換で布の形状を計算する。Weil により、懸垂曲線の計算で布の垂れ下がりやをうまく表現できることが報告されている [3] が、この手法では単純な形状のものしか計算できない。物理モデルは、Hook の法則を基にした弾性体網からなる布のモデルにより、布の形状を計算するもので、静的モデルと動的モデルに分けられる。

静的モデルは、時間に関係しない力の釣合に関心をおくものであり、今岡らにより、有限要素法による衣服のシミュレーションが行なわれた [5]。しかし、布の形状は外部からの力と内部応力により経時的に変化するもので、布の安定状態だけを算出することを目的とする、静的モデ

ルでは布特有の特徴であるシワを満足に表現することができなかった。

動的な布モデルは運動量の保存に関心をおくもので、布のように変形するような場合には、変形モデルと呼ばれる。変形モデルは、布の物理モデルに時間項を取り入れたものであるといえる。Demetrie らにより弾性体変形モデル [1] [2] が提案された。このモデルでは、主に操作者が自分の意図した通りに対象物を変形させるところに重きをおいているために、布の物理特性を設定することが難しく、その結果も満足できるものではない [6]。

布の最大の特徴は、布を動かした時の、しわの発生と消滅にある。Kunii らは、Singularity theory を用いて、そのシワをリアルに表現している [7]。この布の計算モデルは、幾何モデルと物理モデルの両方にまたがるものである。しかし、このモデルでは、シワの発生点、消滅点はあらかじめ設定しなければならない。この設定は、一般には困難なので、筆者らが目指す仮想服飾環境には適しない。

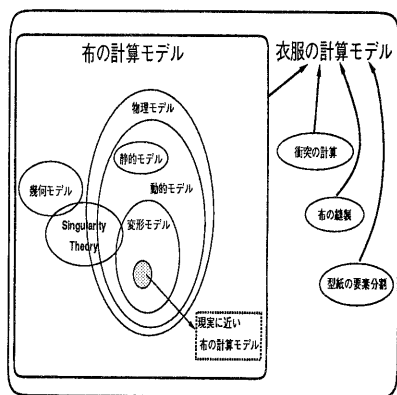


図 2: 布と衣服の計算モデル

このように、布の計算モデルに関しても残された問題点は多く、現実の布に近い布の計算モデルが望まれる。衣服のモデリングに関してはさらに問題が多い。すなわち、理想的な布のモデルが存在すると仮定しても、衣服をモデリングしようとする場合、以下のような問題点がある。

- 衣服の形状は型紙によって決まり、型紙は一般に自由曲線からなる複雑な形状をもっている。
- 衣服は通常複数の型紙を縫製することでできている。
- 衣服は、人体に装着するものであるから、布と人体との衝突が起こる。
- そでやえり等のように、布と布同士の衝突も起こる。

これら 4 つの問題点のうち、最初の 2 つは型紙を要素分割し、分割要素をつないでいく時の問題点 [8] であるので、本論文では議論しない。残りの衝突に関する問題は、衣服の計算モデルを構築する上で重要な課題である。布と人体との衝突や、布と布同士の衝突は、2 つ以上の系が互いに影響を及ぼし合う相関問題としてとらえることができる。衝突には摩擦が関係しており、また、布と布、布と人体の間で多重の衝突も起きるが、布は決して人体の内部にくいこんだり、人体を通り抜けたりはしない。衝突に関しては、固体同士の衝突に関する研究 [4] はなされているが、固体と変形する物質のように、性質の違うもの同士の衝突や、変形する物質同士の衝突に関する研究はほとんどない。また、衣服のシワが衝突の過程を経て形成されると考えると、「衣服のシワの発生は、布と人体との衝突及び、布と布との衝突によるストレスの局所的な集中によるものである」と仮定することができる。もちろん、布中の応力分布によりシワができるのであるが、その応力分布は、衝突によって発生すると考えるのである。

このような観点から衣服の計算モデルを考えると、布の計算モデルの他に、衝突計算を含めなければならないことになる。そこで、理想的な布の計算モデルの研究は今後の課題として、まずは、衝突計算を含んだ衣服の計算モデルを考える。

4 衣服の計算モデルの基本原則

運動の基本原則は、ラグランジェの式より、

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} \right) + \gamma \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t} + \frac{\delta \epsilon(\mathbf{r})}{\delta \mathbf{r}} = \mathbf{f}(\mathbf{r}, t) \quad (1)$$

となる。ここで、 \mathbf{r} は、型紙を要素分割した時の要素点の座標 $[x_i, y_i, z_i]$ 、 ρ は単位質量密度、 γ は振動係数をあらわす。 $\epsilon(\mathbf{r})$ は、布の変形ポテンシャルである。従来の研究 [1] [5] では、衝突を計算するために (1) 式右辺に $\mathbf{f}_{collision}$ を加えていた。 $\mathbf{f}_{collision}$ は衝突力であり、布が体に近づくほど布を体から引き離そうとする力である。この場合、布の変形速度が早い場合や、体が動いている場合等では布が体にくいこんだり、体を通り抜けたりすることが起こる。また、離散時間間隔の値によっても同様なことが起こる。その上、衝突の際に関係する摩擦現象を取り込んでいないので、布は体の表面を滑り落ちてしまうという問題もあった。

そこで筆者らは、運動量の保存則に基づいた衝突モデルを衣服の計算モデルに取り入れ、衝突により、布の変形速度が直接的に変化するようにした。衝突モデルは、衝突関数という形で計算モデルに取り入れた。(1) 式の左辺の第一項は慣性力、第二項と第三項は布の内部力をあらわす。この 2 つの項まとめて \mathbf{f}_{int} とし、 $\mathbf{f}(\mathbf{r}, t)$ は外部力をあらわすので \mathbf{f}_{ext} とする。(1) 式は、 \mathbf{f}_{int} と \mathbf{f}_{ext} が釣り合う様に布が変形することを示している。そこで、布を変

形させる力を Δf とすると、

$$\Delta f = f_{int} + f_{ext} \quad (2)$$

とかける。すると、時刻 t における r 点の速度 \dot{r}^t は、

$$\dot{r}^{t+\Delta t} = \dot{r}^t + \left(\frac{\Delta f}{\rho} + G\right)\Delta t \quad (3)$$

になる。ただし、 G は重力加速度ベクトルであり、 Δt は、微小時間間隔である。このとき、衣服の変形は次のようにかける。

$$r^{t+\Delta t} = r^t + \dot{r}^{t+\Delta t}\Delta t \quad (4)$$

(3)式で、衝突を関数(後述) $Collision()$ であらわすと、

$$\dot{r}^{t+\Delta t} = Collision(\dot{r}^t + \left(\frac{\Delta f}{\rho} + G\right)\Delta t) \quad (5)$$

となる。

5 布の計算モデル

布の計算モデルとしては、弾性網モデルがよく使われる。これは、布の縦、横糸方向の引っ張りに対する復元力をバネの力で表すものである。しかし、布は、本質的に非線形な特性を持っているので、バネの他に非線形な要素を追加しなければならない[2]。図3に筆者らが用いた布の弾性網モデルを、図4には、弾性網モデルの各弾性要素の構成を示す。弾性要素は、バネと減衰器と、塑性要素からなっている。バネは伸びに比例して復元力を発生し、減衰器は変形速度に比例した力を発生する。塑性要素は、伸びが閾値をこえたときに力を発生する。図3、4

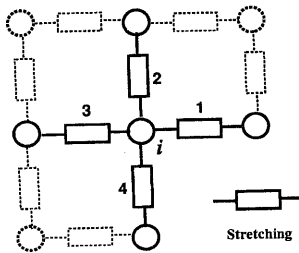


図3: 布の弾性網モデル

からわかるように布の任意の質点 i に生じる内部応力は、

$$f_{int} = f_{spring} + f_{visco} + f_{plas}$$

とかける。右辺の f_{spring} は、

$$f_{spring} = \sum_k \epsilon_{ik} l_{ik} d_{ik}$$

となる。 ϵ_{ik} は復元係数である。 l_{ik} は $i-k$ 点間の伸びで、

$$l_{ik} = \|r_k - r_i\| - l_{ik}^0$$

となる。ここで、 k は i 点の連結点(4近傍点)を表すインデックスであり、 l_{ik}^0 は i 点と k 点間の初期長である。 d_{ik} は、

$$d_{ik} = (r_k - r_i) / \|r_k - r_i\|$$

である。また、 f_{visco} は、

$$f_{visco} = \rho_{visco} \sum_k (\dot{r}_k - \dot{r}_i)$$

となる。 ρ_{visco} は定数で、 f_{visco} には、バネの振動を制定する働きがある。そして、 f_{plas} はバネが閾値よりも伸びた場合に、それ以上伸びることを禁じる力である。つまり、図5に示すように伸びが L_{sh} 以上になった場合、 f_{plas} により、弾性要素をそれ以上に伸ばそうとする力の成分は打ち消される。

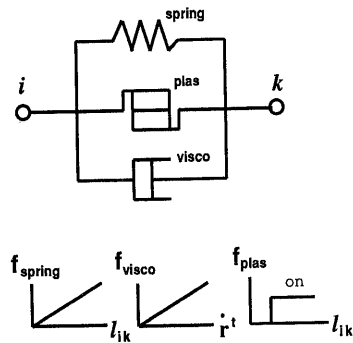


図4: 弾性要素

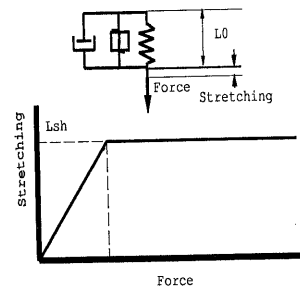


図5: 塑性特性

6 衝突の計算

2つの質点間の衝突は、

$$m_1 \mathbf{r}_1^t + m_2 \mathbf{r}_2^t = m_1 \mathbf{r}_1^{t+\Delta t} + m_2 \mathbf{r}_2^{t+\Delta t} + \omega$$

とかける。ここで、 ω は摩擦等による運動量の損失分をあらわしている。布のある点 \mathbf{r} が、 Δt 時間後に $\Delta \mathbf{r}$ の変位を持つ時、その点は布か体と衝突する可能性がある。その時には、まず、変位ベクトルの方向の衝突候補点を探して、次に、その点が実際に衝突するかどうかを判定する。その点が衝突条件を満たしていれば、作用・反作用の計算を行なう。

6.1 布の衝突の検出

衝突候補点の探索は、基本的にはレイ・トレーシングのヒット・プリミティブの探索と同じであるが、レイ・トレーシングでは基本的に無限遠方にまで探索しなければならないのに対して、布の場合には変位量が小さいので、探索範囲はかなり狭い。そこで、予め対象物の外接立方体を求め、 $[X, Y, Z]$ のそれぞれの方向への正射影をとり、適当な間隔 $[N_x, N_y, N_z]$ で切って対象物の構成要素がどの区間にあるかを記述する区間リストを作っておく。このと

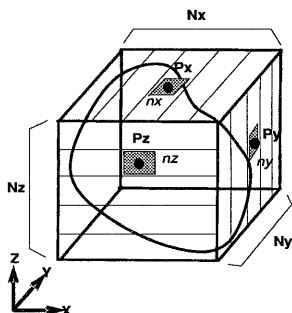


図6: 衝突候補点の検出

き、変位 $\Delta \mathbf{r}$ と布上の点 \mathbf{r} から、探索範囲は、 \mathbf{r} と $\mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}$ を対角な頂点に持つ四角柱の内部に限定される。この四角柱の内部に布か、人体の構成要素が含まれているかどうかは区間リストをみればわかる。今、区間リストからみつけた候補リスト中の要素数を、 X, Y, Z 方向で、それぞれを n_x, n_y, n_z とすると、実際にベクトルと面との交点計算をしなければならない候補要素の数は、

$$n = \min(n_x, n_y, n_z)$$

である。この n 個の要素について3次元的な範囲の判定を行なう。これにより、交点計算回数を減らすことができる。この様子を図6に示す。交点の計算方法は、レイ・ト

レーシングの手法と同じである。このようにして求めた交点 \mathbf{p} と、布上の点 \mathbf{r} が、衝突するかどうかは次の式を満たすかどうかによる。

$$|\mathbf{r}^t - \mathbf{p}^t| - |\mathbf{r}^t \Delta t| + (\mathbf{p}^t \cdot \mathbf{r}^t) \Delta t < \epsilon \quad (6)$$

ここで、 ϵ は布の厚みに相当する定数である。 (\cdot) は、内積をあらわす。図7は、布が1~4時相の順に動いた時の衝突点の衝突条件を示している。この図では、第2時相から第3時相までの間で衝突が起きることを示している。そして、衝突後の布は第4時相の位置に移る。

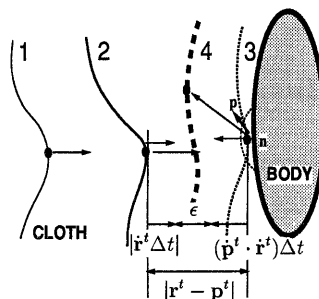


図7: 衝突条件

6.2 衝突に対する応答

(6)式の衝突条件が成立したならば、衝突による速度ベクトルの修正を行なう。(5)式は、衝突により速度が変化することをあらわしているので、

$$\mathbf{r}^t = \text{Collision}(\mathbf{r}^t) \quad (7)$$

とかける。この式は、衝突前の速度 \mathbf{r}^t が、衝突後には \mathbf{r}^t に変わることを示している。衝突による速度ベクトルの修正は、 $\text{Collision}()$ 関数で行なわれる。しかし、 $\text{Collision}()$ 関数は、単純な関数ではなく、布の衝突に対する応答は、被衝突点が人体であるか、布であるかで違ってくる。人体は、布と比べて大きな質量をもち、布の作用に対しては影響を受けない。逆に布は、人体からの反作用を受ける。また、布と布同士の衝突の場合には、被衝突点は衝突点の作用を受ける。衝突点は、衝突により運動量を失い速度が小さくなる。

まず、布と人体との衝突時の応答を説明する。もし、布の要素点 \mathbf{r}^t が体の表面上の点 \mathbf{p}^t と衝突したとき、速度ベクトル \mathbf{r}^t は、 \mathbf{r}^t に変化する。これは、反作用によるものである。今、体の表面に沿って ξ 軸をとり、体の表面の法線方向に η 軸をとると、 \mathbf{r}^t は次のように分解できる。

$$\mathbf{r}^t = \mathbf{r}_\xi^t + \mathbf{r}_\eta^t \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{r}}_{\eta}^t &= -(\dot{\mathbf{r}}^t \cdot (-\mathbf{n}^t))\mathbf{n}^t \\ (0 < \mu) \end{aligned} \quad (9)$$

ξ 軸成分は、摩擦の影響を受ける。

$$\text{if } |\dot{\mathbf{r}}_{\xi}^t| < |\mu \dot{\mathbf{r}}_{\eta}^t| \text{ then } \dot{\mathbf{r}}_{\xi}^t = 0 \text{ else } \dot{\mathbf{r}}_{\xi}^t = \dot{\mathbf{r}}^t - \mu \dot{\mathbf{r}}_{\eta}^t \quad (10)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_{\eta}^t = \sigma \dot{\mathbf{r}}_{\eta}^t \quad (0 < \sigma < 1) \quad (11)$$

μ は体の皮膚摩擦係数、 σ は布の弾性係数である。布と体の衝突の場合には(7)式は、

$$\dot{\mathbf{r}}^t = \dot{\mathbf{r}}_{\xi}^t + \dot{\mathbf{r}}_{\eta}^t + \dot{\mathbf{p}}^t \quad (12)$$

となる。ここで \mathbf{n}^t は \mathbf{p}^t 点の法線ベクトルを、 $\dot{\mathbf{p}}^t$ は \mathbf{p}^t 点の速度を示す。図8は、体が静止している($\dot{\mathbf{p}}^t = 0$)ときの反作用の影響を示している。体が動いている時には、

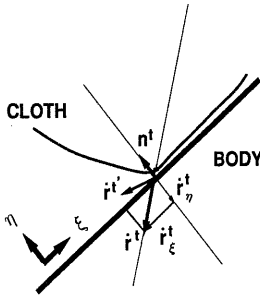


図8: 反作用の計算

$\dot{\mathbf{p}}^t$ を別に計算する必要がある。(10)式は、物理的には摩擦円錐[10]を表す。図9に示すように、円錐の内部にある速度ベクトルに対しては摩擦により、 ξ 軸成分が零になる。すなわち、体の表面に沿っては滑べらず、体表面の法線方向成分のみになる。図9の $\dot{\mathbf{r}}_1$ は、反作用を受けた後は $\dot{\mathbf{r}}_2$ になる。速度ベクトルが円錐の外側にある場合には、法線(η 軸)方向のベクトル成分の大きさに関係した摩擦が発生する。すなわち、 $\dot{\mathbf{r}}_3$ は、 $\dot{\mathbf{r}}_4$ に変化する。

次に布同士の衝突時の応答について説明する。ある時刻 t で、布の衝突点 \mathbf{r}_0^t と布の被衝突点 \mathbf{r}_1^t を考えると、衝突によりそれぞれの点の速度ベクトルは、

$$\dot{\mathbf{r}}_0^t = \kappa \gamma \dot{\mathbf{r}}_0^t \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{r}}_1^t = \kappa \{ \dot{\mathbf{r}}_1^t + (1 - \gamma) \dot{\mathbf{r}}_0^t \} \quad (14)$$

$$0 \leq \gamma, \kappa \leq 1$$

と変化する。ここで γ は、衝突による運動量の伝播係数、 κ は、布同士の摩擦による運動量の減衰係数である。なお、布の近傍要素点との衝突であった時にはこの計算は行わない。

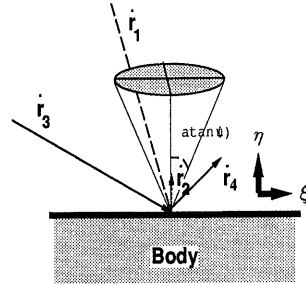


図9: 摩擦円錐

実際には多重の衝突が起こる。例えば、布は布と衝突し、その布は別の布と衝突をするかもしれない。何度も布同士の衝突を繰り返した後、体と衝突するかもしれない。体と衝突した時には反作用が発生し、その反作用力は布に作用を及ぼす。この作用は布が衝突してきた順序の逆に布中を伝播していくことになる。図10で、このような一連の過程の一例を説明する。これは、布が2重になっていてそれぞれの布が体と衝突する時の様子である。

1. 外側の布が内側の布と衝突する。
2. 内側の布に作用の伝播が起こる。
3. 内側の布が体と衝突し、反作用が発生する。
4. 反作用が内側の布から外側の布に伝播する。

もちろん、布が何重になっても同様である。このような一連のシーケンスを計算するために、作用の過程をスタックにプッシュし、反作用の検出の時点からスタックをポップして、逆向き方向の作用の計算をするようにする。

7 計算実験

上述の手法を用いて計算実験を行なった。まず最初に、布が棒に掛けられていて、横風が吹いてきた時の布の動きを図11に示す。風下の布は、風上の布により風の力の影響を受けない。そして風上の布は、風に押されて風下の布を押すようになる。この例では、布と支持棒及び布と布同士の衝突が起こっている。

次に、実際のワンピースの型紙から3次元形状を計算した。ワンピースの型紙は、要素分割を施し、縫製情報を付け加えた。人体台は、縫製用の人体台を測定し、楕円で近似し法線情報付きの3角パッチにした。従って、肩のライン等はあまり正確ではない。全体のエネルギー(主にパネのエネルギー)が低い値に落ち着くまで、慣性項を無視して反復計算を行ない、初期形状を作った。初期

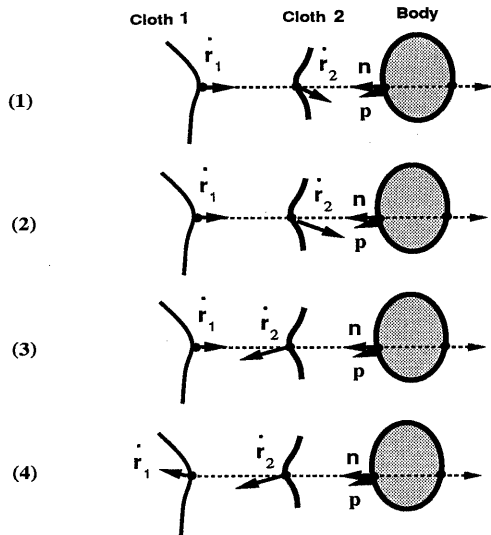


図 10: 衝突のシーケンス

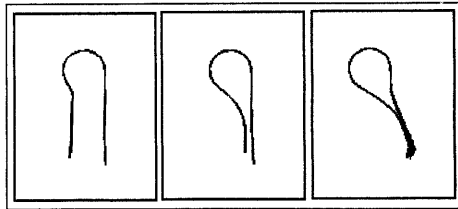
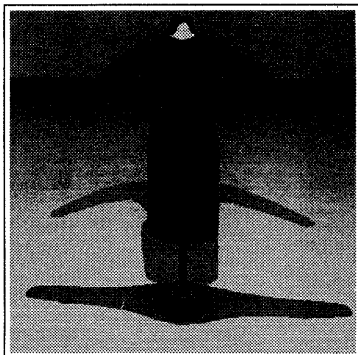


図 11: 風による布の動き



前面図

図 12: 初期位置

形状を図 12 に示す。次に初期形状から変形の反復計算を行なった。すると、重力の影響でそでが自由落下した。この時の、布のパラメータには、ウール・フラノの特性値を用いた。パラメータの詳細内訳を表 1 に示す。図 13 は $\Delta t = 0.0001$ で、1000 回毎の繰り返し計算の結果

表 1: パラメータの内訳

縦伸び回復力	1000.0 g/cm^2
横伸び回復力	920.0 g/cm^2
単位質量密度 ρ	0.023 g/cm^2
減衰係数 ρ_{visco}	4.0
布の弾性係数 σ	0.03
人体の皮膚摩擦係数 μ	0.6
作用の伝播係数 γ	0.5
布の摩擦係数 κ	0.23
塑性限界 L_{sh}	9.95 %

をワイヤーフレームで表示したものである。自由落下によりそでが落ちていく過程がわかる。図 14 は、最後の計

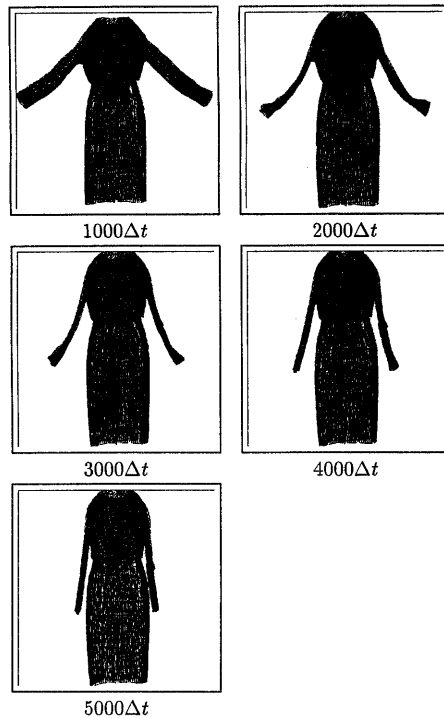


図 13: そでの落下のシーケンス

算結果を可視化したものである。レンダリングでは、テクスチャー・マッピングにより柄模様をつけたり、部分的

に光の透過率を変えてレース調にしたり、パンプ・マッピングによりチェックを入れたりすることも可能であるが、これは、レンダリングと光学特性値のデータベース等の問題である。

8 まとめ

今回提案した動的変形可能な衣服の形状モデラは、

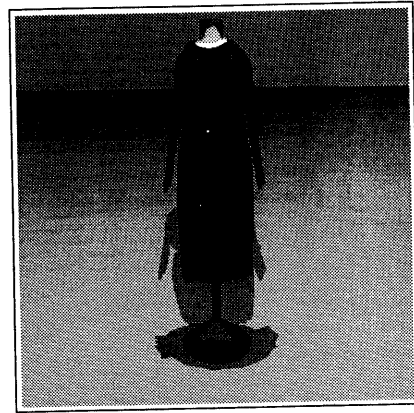
- 布が人体と衝突した時の反作用を取り扱っている。
- 布が布と衝突した時の相互作用（作用、反作用）を取り扱っている。

という特徴がある。しかしながら、実物のワンピースとレンダリングの結果を見比べると、そでの部分にかなりの違いがある。この原因には、主に布の計算モデルが不十分であることが挙げられる。布の計算モデルに、物性値（ヤング率、ポアソン比等）を考慮に入れて内部応力を正確にモデル化する [9] 必要があると考える。

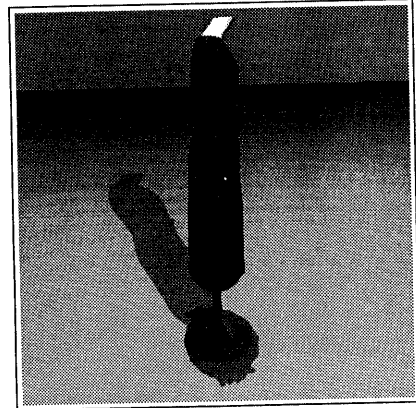
今後は、現実の布に近い布モデルを構築し PARTY に取り入れること、及び、計算の結果と実際の衣服との見かけの差を定量的に評価する基準を考える必要がある。

参考文献

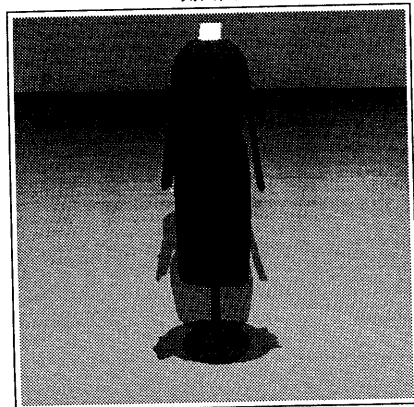
- [1] Demetris Terzopoulos; *Elastically Deformable Models*, Computer Graphics, Vol 21, No 4, 1987.
- [2] Demetris Terzopoulos; *Modeling Inelastic Deformation: Viscoelasticity, Plasticity, Fracture*, Computer Graphics, Vol 22, No 4, 1988.
- [3] Jerry Weil; *The Synthesis of Cloth Objects*, Computer Graphics, Vol 20, No 4, 1986.
- [4] Matthew Moore; *Collision Detection and Response for Computer Animation*, Computer Graphics, Vol 22, No 4, 1988.
- [5] 今岡春樹 他; 衣服立体形状予測法, 繊維学界誌, Vol 45, No 10, 1989.
- [6] 宇田, 鶴岡, 木村, 三宅; スカートの着装シミュレーション, 第19回画像工学コンファレンス, 5-12, 1988.
- [7] T.L.Kunii, H.Gotoda; *Singularity Theoretical Modeling and Animation of Garment Wrinkle Formation Process*, The Visual Computer, Vol 6, No 6, pp 326-336, 1990.
- [8] 坂口, 美濃, 池田; 着装シミュレーションのための型紙要素分割法, 1991年電子情報通信学会春季全国大会 D-653.
- [9] M.Aono; *A Wrinkle Propagation Model for Cloth*, CG International '90, Springer-Verlag pp 95-115, 1991.
- [10] 河野; 摩擦の科学, 裳華房, 1989.



前面図



側面図



後面図

図 14: そでのあるワンピース