

実時間衣服シミュレーションによる仮想試着システムの実現

Real-Time Cloth Simulation and Its Application to a Virtual Try-On System

尾下 真樹
Masaki OSHITA

九州工業大学 情報工学部 制御システム工学科
Kyushu Institute of Technology
E-mail: oshita@ces.kyutech.ac.jp

牧之内 顕文
Akifumi MAKINOUCHI

九州大学 システム情報科学研究院 知能システム学部門
Kyushu University
E-mail: akifumi@is.kyushu-u.ac.jp

1 はじめに

本論文では、衣服の自然なアニメーションをリアルタイムに生成するための手法を提案する。本手法では、粒子モデルによる動力学シミュレーションと幾何的な曲面制御手法を組み合わせることによって、衣服の自然なアニメーションを高速に生成する (図 1)。本手法では、まず、最小限の粒子のみを用いて動力学シミュレーションを行い、衣服のおおまかな動きを計算する。その後、計算された粒子の位置をもとに、幾何学的な曲面生成手法を用いることで、最終的な衣服の表面形状を生成する。この時、衣服の下の人体形状に合わせて衣服の表面形状を変形する。また、衣服の表面に働く力を分析することによって衣服のしわなどの細部の形状変化を計算する。このような幾何学的な処理を適用することによって、衣服の自然な表面形状を高速に生成することができる。

また、実時間衣服シミュレーションのアプリケーションとして、仮想試着システムのプロトタイプを開発した。仮想試着システムは、利用者の動きをモーションキャプチャ機器で取り込み、リアルタイムに衣服シミュレーションを行って利用者の前のスクリーンに映し出すことで、あたかも利用者が仮想空間内でさまざまな衣服を試着するような体験を可能にするシステムである (図 2)。

2 関連研究

粗い幾何形状モデルから詳細な幾何形状モデルを生成する細分割技術はモデリングなどで広く使われている。これらの技術を適用することによって、動力学シミュレーションを用いて計算された粗い衣服モデルから、なめらかな衣服モデルを生成することができる。しかし、シミュレーションに用いるもとのモデルが比較的粗い場合、単純になめらかな曲面を生成するだけでは衣服のしわなどを再現することができないため、何らかの衣服に特化した曲面生成手法が必要になると考えられる。

近年、本研究と同様、動力学シミュレーションと幾何学的な処理を組み合わせることによって高速に衣服シミュレーションを行うことを目標とした手法がいくつか提案されている。Hadap ら[6]は、あらかじめしわのデータをディスプレイマップとして用意しておき、粗い衣服モデルの圧縮の程度に応じてディスプレイマ



図 1: 提案手法の具体例。(a)少数の粒子モデルによるシミュレーション。(b)最終的に生成された衣服の表面形状。

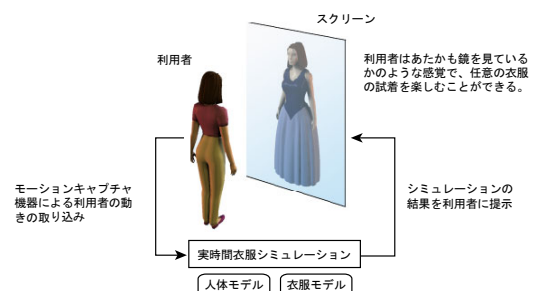


図 2: 仮想試着システムのイメージ図

ップを適用することで、衣服のしわを表現する手法を提案した。我々の先行研究[9]では、粗い衣服モデルから詳細な衣服モデルを生成する際に、粗い衣服モデルの縮んでいる辺上にふくらみを追加する手法を提案した。Kang ら[8]は、粗い衣服モデルのシミュレーション結果に追従するように詳細な衣服モデルの形状を強制的に修正し、その後弾性力のみを考慮して詳細な衣服モデルの簡易的なシミュレーションを行う手法を提案した。Cordier ら[4]は、衣服のそでなど体に接している範囲を円柱としてモデル化し、ゆれなどをシミュレートする手法を提案していた。しかし、これら既存の手法は、曲面生成時に人体モデルとの接触を考慮しておらず、生成されるしわの形状も限定されている。本手法では、このような問題を解決し、衣服と体が接触している範囲も扱うことができ、また、衣服の表面に働く力に応じて細かいしわを生成するための近似モデルを提案している。

3 少数粒子による動力学シミュレーション

本節では、少数の粒子による動力学シミュレーション手法について述べる。本論文で提案する衣服の表面形状の生成手法は、少数の粒子を用いてシミュレートされた粗い衣服モデルの形状をもとに最終的な衣服の表面形状を生成する。従って、基本的には、少数粒子の動力学シミュレーションにはどのような手法を用いても構わない。しかし、少数の粒子モデルを使って高速にシミュレーションを行い、また、次に適用する表面形状の生成処理とうまく協調するためにはいくつかの工夫が必要となる。以下、本研究で行った、それらの内容について述べる。

3.1 数値積分手法

粒子ベースの動力学シミュレーションを計算するための数値積分のための主な解法として、**Explicit** 手法と **Implicit** 手法の2種類がある。**Implicit** 手法は、**Explicit** 手法に比べてシミュレーションの刻み幅を大きくできるため高速に計算を行うことができるというメリットがあり、**Baraff** ら[1]により提案されて以来、近年広く使われている。しかし、本手法で用いるような、めり込み回避や人体動作への追従処理などの強制的に粒子の位置を修正する制約を扱いつらいという問題がある。そこで、本手法では、**Explicit** 手法のひとつである、4次の **Runge-Kutta** 法を使用することとした。一般に、ごく少数の粒子のみを扱う場合であれば、**Explicit** 手法であっても **Implicit** 手法と同じ程度に高速に処理することができる。

3.2 力のモデル

粒子ベースの動力学シミュレーションでは、粒子に働く各種の力をモデル化する必要がある。衣服シミュレーションにおいてとりわけ重要とされるのが衣服の弾性力である。弾性力は2つの隣接する粒子の間に働く一種のばねのような力としてモデル化される。

$$\mathbf{f}_{ij} = k_{\text{elastic}} \frac{(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)}{L_{ij}} (|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j| - L_{ij}), \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j$ は隣接する2つの粒子の位置であり、 L_{ij} は安定状態での両者の距離である。また、 k_{elastic} はそのパラメタである。一般に、衣服の弾性力は非常に強い、衣服の長さはほとんど変化しない性質がある。このような衣服の実現するためには、弾性力のパラメタ k_{elastic} は大きな値を設定する必要がある。もし、 k_{elastic} が十分小さくなければ、衣服はゴムのように伸び縮みしてしまい、非常に不自然な印象を与えてしまう。

しかし、我々の手法では、粗い衣服モデルのシミュレーションにおいて縮んでしまった範囲にしわを追加することで、衣服の長さを一定に保つように最終的な衣服の表面形状を生成する。従って、少数粒子のシミュレーションの段階では粒子間の距離を一定に保つ必要はなく、むしろある程度粒子間の距離が縮まることを許した方が

効果的に衣服のしわが生成される。しかし、衣服の長さが延びてしまっている場合は、このような方法では対応できない。そこで本手法の弾性力のモデルでは2種類の k_{elastic} を使い、2つの粒子間の距離がもとの長さよりも離れている場合は大きな $k_{\text{elastic_compress}}$ を、もとの長さよりも短い場合は小さな $k_{\text{elastic_stretch}}$ を使用する。

上記の弾性力に加えて、屈折力、摩擦力、重力、空気抵抗力などの力のモデルを導入した。これらについては、基本的に既存の **Explicit** 積分ベースの力のモデルと同様であるため詳しい数式は省略する。

3.3 衝突判定とめり込み回避

本手法では、少数粒子によるシミュレーションでは、頂点のめり込み回避だけを行い、辺のめり込み回避は行わない。粗いモデルで無理にめり込み回避は行おうとすると、もとの粗いメッシュの影響をうけて最終的に生成される形状が逆に不自然になってしまうためである。正確なめり込み回避処理は、次のステップである衣服の表面形状の生成処理で行われる。

衣服と人体モデルの衝突判定を高速化するため、五十嵐ら[7]と同様のアプローチをとり、粗い衣服モデルの各粒子ごとに人体モデルを構成する頂点のうち最も近い頂点の情報を持たせる。この最近頂点の情報は、毎回衝突判定の前に、前回のステップの最近頂点の周囲の頂点を探索することによって更新される。衝突判定時にはこの最近頂点の情報を参照し、人体モデルを構成する面のうち最近頂点を含む全ての面の内側に衣服の頂点が存在するかを判定することによって、衝突判定を行う。

衝突判定の結果、衣服モデルの粒子が人体モデルにめり込んでいる場合は、その粒子の位置を人体モデル上の点に強制的に移動することによってめり込みを回避する。

3.4 人体の動作への追従処理

一般に、実時間シミュレーションでは刻み幅を大きくする必要があり、必然的に人体モデルのフレーム間での動きも大きくなるため、そのままでは人体モデルが衣服を突き抜けてしまう現象が生じる。

このような問題を防ぐため、シミュレーションを行う前に人体モデルの姿勢変化に応じて粒子の位置を強制的に修正する。ここでも、衝突判定処理に使用した人体モデル上の最近点の情報を使用する。前ステップのシミュレーション終了時に、衣服の各粒子ごとに、人体モデルの最近面からの相対座標を記録しておく。そして、次のステップのシミュレーションの前に、与えられた人体モデルの変形に応じて、最近面からの相対座標が保存されるように、衣服の各粒子の距離を強制的に修正する。

4 衣服の表面形状の生成手法

本節では、動力学シミュレーションによって計算された粗い衣服モデルの形状から、詳細な衣服モデルの表面



図 3: 衣服の表面形状の計算手順。(a) 少数粒子による動力学シミュレーション。黒の粒子は人体モデルとの接触を表す。(b) 細分割手法により生成されたなめらかな詳細モデル。(c) 詳細モデルのめり込み回避処理。灰色の点はめり込み回避処理された粒子を表す。(d) 詳細モデルの各粒子における長さ。黒いベクトルは縮んでいる粒子を示す。(e) 詳細モデルの各粒子に働く垂直方向の力。黒いベクトルは周囲から押されている粒子、灰色のベクトルは周囲から引かれている粒子を表す。(f) 曲面制御の可視化。灰色のベクトルはめり込み回避処理による変形、黒いベクトルは弾性力と伸縮状態に応じた変形を表す。(g) 最終的に生成された衣服の表面形状。

形状を生成するための手法について述べる。

まず、粗い衣服モデルに対して細分割手法を適用することで、なめらかな詳細な衣服モデルを生成する。

次に、詳細な衣服モデルのそれぞれの粒子の高さを制御し、各粒子を垂直方向に移動する事によって、衣服の表面形状を変形する。

$$P_i = P_{\text{smoothed},i} + \Delta h_i \mathbf{n}_i \quad (2)$$

各粒子の高さの初期値としては前フレームの高さが用いられ、下記の2つの処理によって修正される。

- 粒子が人体モデルにめり込まないための処理
- 粒子に働く垂直方向の力と粒子の周囲の辺の長さに応じた変形処理

上記の処理は、以下の式によって表される。

$$\Delta h_i = \Delta h_{\text{last_frame},i} + \Delta h_{\text{penetration},i} + \Delta h_{\text{deformation},i} \quad (3)$$

以下、それぞれの処理について順を追って説明する。

4.1 基準となる表面形状の生成

粗い衣服モデルから詳細な衣服モデルを生成するための細分割手法として、Vlachos らによって提案された PN Triangles[10] を用いる。PN Triangles は、ポリゴンメッシュの三角面を3次 Bezier 曲面パッチで置き換えることで、曲面を生成する手法である。PN Triangles によって生成された曲面はもとの粗いメッシュの頂点を必ず通るため、頂点における人体モデルとの接触状態が保存されるという利点がある。

現在の我々の実装では、粗い衣服モデルのそれぞれの三角面に対応する3次 Bezier 曲面パッチを、一定数の三角面に分割することで詳細な衣服モデルを生成している。

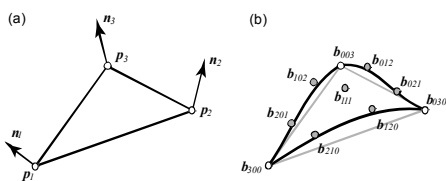


図 4: PN Triangles : (a)もとの三角面 (b)3次ベジエ曲面

詳細モデルのそれぞれの粒子の制御方向 \mathbf{n}_i は、粗いモデルの頂点の法線を補間することで計算する。

4.2 表面形状のめり込み回避処理

生成された表面形状が人体モデルにめり込んでいる場合、粗い衣服モデルのめり込み回避処理と同様、めり込みを回避するように各粒子の高さ $\Delta h_{\text{penetration},i}$ を修正する。この時、全ての粒子について衝突判定を行うと非常に多くの処理時間が必要となる。そこで、粗い粒子モデルの粒子の接触情報を利用することで、衝突の可能性のある粒子から順番に判定していく。具体的には、粗いモデルのある面のどの頂点も人体モデルと接触していない場合は、その面内の粒子は接触判定を行わない。また、人体モデルに接している面についても、面内をトップダウンに分割した時の上位の粒子が人体モデルに接している場合のみ、下位の粒子の接触判定を順次行っていく。

4.3 表面形状の変形

本研究の重要なアイデアのひとつは、各粒子に働く周囲からの弾性力をもとに垂直方向の変形を計算する、というものである。このアイデアは、Choi らによって提案された、衣服の細部の膨らみをシミュレートする力のモデルにヒントを得たものである。Choi ら[3]は、Implicit 積分手法を用いて衣服シミュレーションを行う際に、衣服のある範囲が周囲から力を受ける時、その範囲は力が釣り合うように丸く膨らむような形状を取るという力のモデルを導入した。本手法では、同様の仮定に基づき、ある粒子に周囲からの力が集中しているほど、その粒子はより膨らむ方向に変化するよう変形処理を行う。

一般に粒子モデルによる衣服シミュレーションでは、ある粒子に働く全ての力を合計することによって、その粒子の運動を計算する。従って、ある粒子に周囲から大きな力が働いている場合であっても、力の合計がゼロに近ければその粒子は運動しないことになる。衣服の表面に水平な方向の運動を計算するだけであればこのような

方法でも構わないが、本モデルのように表面に対して垂直方向の変形をシミュレートする場合、単純に周囲からの力を合計するだけではなく、各方向からの力同士の影響を考慮する必要がある。

上記の垂直方向の力に加えて、本手法では、辺の長さを制約として考慮する。粗い衣服モデルの動力学シミュレーションの結果、ある辺が縮められている場合は、その範囲の衣服の長さを一定に保たれるように、垂直方向の力に応じてしわを生成する。

以下、まず、垂直方向の力の計算、及び、衣服の表面の圧縮度合いの計算方法について述べ、その2つの制約を考慮してどのように変形量を決定するかを説明する。

4.3.1 垂直方向の力の計算

まず、詳細モデルの各粒子に働く弾性力を、粗いモデルの各粒子に働く弾性力を表面の曲率を考慮しながら補間することによって計算する。Kang ら[8] が行ったように、詳細な衣服モデルの各粒子の位置から、弾性力のモデルに従って各粒子の弾性力を計算することも可能である。しかし、この方法では各粒子の位置の差によって粒子ごとの弾性力が大きく異なり、結果として、垂直方向の力がばらついたり不安定になったりしてしまう。本手法では、それぞれの粒子単体で力を正確にシミュレートするよりも、表面に加わる力の分布に応じて近似的な変形を適用するのが目的である。そのため、上記のように粗いモデルの粒子に働く弾性力から計算する方針とした。

具体的には、まず、粗いモデルの粒子から、粗いモデルの辺上の粒子、面内部の粒子に向けて、各粒子の曲率に応じて力を補間する。本手法では、粒子間の曲率（両辺の角度）に応じて、どれくらい力が伝わるかが変化するかを決定する。現在では、両辺の角度を単純に力の伝達率としている。

$$c_k^{i,j} = \cos \theta = \frac{(\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_i) \cdot (\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_k)}{|\mathbf{p}_k - \mathbf{p}_i| |\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_k|}. \quad (4)$$

実際には、衣服の素材などによっても、角度と伝達率の関係は異なると考えられる。各種の素材を再現できるようにより正確な伝達率のモデル化については、今後の検討課題のひとつである。

各粒子ごとの伝達率が決まれば、辺上の全粒子の伝達率を加重平均することで、辺の両端点の粒子の弾性力から、粒子上の各粒子の弾性力が求まる。

$$\mathbf{e}\mathbf{f}_i = \frac{\sum_{j=2}^{i-1} c_j^{j-1,j+1} + 0.5 \times c_i^{i-1,i+1}}{\sum_{j=2}^{n-1} c_j^{j-1,j+1}} (\mathbf{f}_n - \mathbf{f}_1) + \mathbf{f}_1. \quad (5)$$

同様に、辺上の粒子の弾性力が決定すれば、縦方向と横方向のそれぞれについて同様に面内の各粒子の弾性力を計算し、両者を平均することによって、面内の各粒子の弾性力も計算できる。

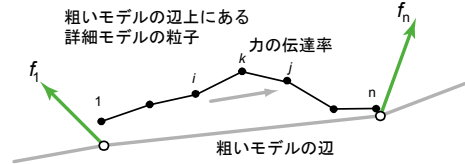


図 5: 粗いモデルの辺上にある詳細モデルの粒子間の曲率、及び、力の伝達率の計算。

各粒子の弾性力が決まったら、隣接する粒子から加わる弾性力をもとに垂直方向の力を計算する。粒子 i に隣接する粒子 j に弾性力 $\mathbf{e}\mathbf{f}_j$ が加わる時の粒子 i への垂直方向の力を下記の式によって決定する。

$$v_i^j = \frac{1}{|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j|} (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j) \cdot \mathbf{e}\mathbf{f}_j. \quad (6)$$

最後に、隣接する全ての粒子からの垂直方向の力を加算することで、粒子に働く垂直方向の力を決定する。

$$v_i = \sum v_i^j. \quad (7)$$

ここで、 v_i が正であれば、粒子 i は周囲から押されており、より起伏が大きくなる方向へと変形することを意味する。つまり、粒子 i が周囲の粒子よりも高い位置にあればより高い位置に移動し、周囲の粒子よりも低い位置にあればより低い位置に移動することになる。一方、 v_i が負であれば周囲から引かれており、より水平になる方向へと変形する。現在は、 v_i が正であれば単純に上方向に移動し、 v_i が負であれば単純に下方向に移動するものとして処理している。

4.3.2 衣服の表面の長さの制御

衣服の表面の長さを一定に保つための各粒子の変形量 $\Delta h_{\text{length},i}$ を、下記の3段階の処理によって計算する。まず、表面の長さを一定に保つために粒子 i の付近でどれくらい長さが変化が必要かという値 $\Delta L_{\text{required},i}$ を計算する。次に、垂直方向の力 v_i に応じて粒子 i の位置を変化させた時、どれくらい長さが変化するかという値 $\Delta L_{\text{expected},i}$ を計算する。最後に、 $\Delta L_{\text{required},i}$ と $\Delta L_{\text{expected},i}$ に応じて、粒子の位置変化量 $\Delta h_{\text{length},i}$ を計算する。

各粒子当たりの長さの必要変化量 $\Delta L_{\text{required},i}$ を直接計算することは難しい。そこで、まず、粗いモデルの辺 e ごとに、安定状態での辺の長さとの差から、辺の長さがどれくらい変化するべきかという値 $\Delta LE_{\text{required},e}$ を求める。

$$\Delta LE_{\text{required},e} = \sum_{i=1}^{n-1} |\mathbf{p}_{i+1} - \mathbf{p}_i| - L_{\text{rest},e}. \quad (8)$$

次に、辺ごとの長さの変化量を、弾性力を計算した時と同様のアルゴリズムで面内に分配することによって、それぞれの粒子の $\Delta L_{\text{required},i}$ を計算する。具体的には、粗いモデルの各粒子ごとに、隣接する辺の必要変化量 $\Delta LE_{\text{required},e}$ を平均することで、粒子の必要変化量 $\Delta L_{\text{required},i}$ を計算する。この粒子ごとの値を、辺上の粒子、面内の粒子に順に補間することで、全粒子の値 $\Delta L_{\text{required},i}$ を計算する。弾性力の計算の場合とは異なり、ここでは粒子の曲率や伝達率は

考慮せず、単純に補間することで計算する。

各粒子の $\Delta L_{\text{expected},j}$ を表面形状から解析的に求めることは難しい。そこで、各粒子が垂直方向の力に比例して動くことと仮定し、周囲の粒子との垂直方向の力の差から $\Delta L_{\text{expected},j}$ を近似する。すでに高い粒子がより大きく移動する場合は長さは広がるとし、反対であれば縮まるとする。

$$\Delta L_{\text{expected},j} = \sum_j \Delta L_{\text{expected},j} \cdot \quad (9)$$

$$\Delta L_{\text{expected},j} = \begin{cases} k_{\text{out-plane}} \cdot |v_i - v_j| & \text{if } (v_i - v_j) \cdot (\Delta h_i - \Delta h_j) \geq 0 \\ -k_{\text{out-plane}} \cdot |v_i - v_j| & \text{if } (v_i - v_j) \cdot (\Delta h_i - \Delta h_j) < 0 \end{cases} \quad (10)$$

最後に、 $\Delta L_{\text{required},j}$ と $\Delta L_{\text{expected},j}$ に応じて、粒子の位置変化量 $\Delta h_{\text{length},j}$ を計算する。

$$\Delta h_{\text{length},j} = \begin{cases} \Delta L_{\text{required},j} / \Delta L_{\text{expected},j} & \text{if } \Delta L_{\text{required},j} \cdot \Delta L_{\text{expected},j} > 0 \\ 0 & \text{if } \Delta L_{\text{required},j} \cdot \Delta L_{\text{expected},j} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

ただし、両者の符号が反対であれば、修正は行われぬ。

4.3.3 変形アルゴリズム

上記の計算において、粒子 i に働く垂直方向の力が比較的小さい場合、 $\Delta L_{\text{expected},j}$ も小さくなり、結果的に $\Delta h_{\text{length},j}$ が非常に大きな値になってしまっており、不自然に大きくなしが生成されてしまう。そのため、必ずしも $\Delta L_{\text{required},j}$ を満たそうとはせず、垂直方向の力によってどれ程位置変化を許すかという値 $\Delta h_{\text{out-plane,force},j}$ によってこの値を制限する。

$$\Delta h_{\text{out-plane,force},j} = k_{\text{out-plane}} \cdot v_i \cdot \Delta t \quad (12)$$

ここで、 Δt はシミュレーションの刻み幅、 $k_{\text{out-plane}}$ は単位時間・垂直方向の力当たり、どれくらいの位置変化を許すかというパラメータである。現在の実験では、 $k_{\text{out-plane}} = 1.0$ くらいの値を用いている。ここまでに計算された $\Delta h_{\text{length},j}$ と $\Delta h_{\text{out-plane,force},j}$ の内、小さい方の値が変形処理による粒子 i の垂直方向の位置変化量 $\Delta h_{\text{deformation},j}$ として使用される。

4.3.4 変形の制約

最後に、上記の各処理、及び、式(3)によって計算された粒子の位置修正量 Δh_i に対して、いくつかの制約を適用する。まず、常に基準となる曲面よりも低くなることのないように $\Delta h_i \geq 0$ という制約を適用する。次に、隣接する粒子間が一定以上長くなるような制約を適用する。最後に、粗いモデルの面を構成する全ての辺においての長さがもとの長さよりも長い場合 $\Delta L_{\text{required},e} < 0$ は、その面の内部にはしわがなくなるよう、面内の粒子の高さを $\Delta h_i = 0$ と修正する。以上の処理により、各粒子の高さ Δh_i 、及び、最終位置 \mathbf{P}_i が求まる。

4.4 粒子の法線の計算

最後に、シェーディングに使用する詳細モデルの各粒子の法線の計算方法について述べる。各粒子の法線を、単純に最終的に生成された表面形状から計算することもできる。しかし、本手法ではそれぞれの粒子を独立かつ近似的に制御するため、隣接する粒子の高さが不規則に



図6: 法線の計算。(a) PN Triangles による生成曲面の法線を面の法線から計算したもの。(b) 同じ曲面の法線を PN Triangles の提供する補間法線を使用して計算したもの。(c) 提案手法によって生成された表面形状の法線を面の法線から計算したもの。(d) 同じ表面形状の法線を(b)と(c)をブレンドして計算。

なる場合があり、単純に計算された法線では必要以上に角張った印象を与えてしまう。また、PN Triangles のもとの問題として、生成曲面は必ずもとの頂点を通るという制約のため、一定の周期で波状になってしまうという問題がある。そのため、PN Triangles では、もとの粗いメッシュの頂点の法線を補間することで詳細メッシュの頂点を計算し、なめらかにシェーディングを行う手法が提供されている[10]。本手法でも、この PN Triangles によって計算された法線を使用する。変形後の曲面から計算された法線 $\mathbf{n}_{\text{deform}}$ (図6(c)) と、PN Triangles により計算された基準曲面の法線 \mathbf{n}_{pnt} (図6(b)) を各粒子の高さ Δh_i に応じてブレンドすることで最終的な法線を計算する。

$$\alpha = \begin{cases} 1.0 & \text{if } \Delta h_i \geq h_{\text{normal}} \\ \Delta h_i / h_{\text{normal}} & \text{if } \Delta h_i < h_{\text{normal}} \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{n}_i = \frac{\alpha \mathbf{n}_{\text{deform}} + (1 - \alpha) \mathbf{n}_{\text{pnt}}}{|\alpha \mathbf{n}_{\text{deform}} + (1 - \alpha) \mathbf{n}_{\text{pnt}}|} \quad (14)$$

h_{normal} はブレンド比率を決定するためのパラメータである。

5 実験結果と議論

提案手法によって生成されたアニメーションの例を図7に示す。表1は、それぞれの衣服モデルの頂点数、及び、処理時間を表している。実験結果の画像から、本手法の狙い通り、衣服が人体モデルに接している範囲では人体モデルに沿った形状になっており、また、衣服の特に圧縮されている範囲に細かいしわが生成されていることが分かる。しかし、本手法の扱うしわは近似的なものであり、生成される形状には制約がある。本手法では、各粒子を法線方向にのみ移動するため、衣服が自分自身を巻き込むような複雑なしわを生成することはできない。また、衣服同士の衝突処理を行っていないため、衣服同士が重なってできるようなしわにも対応できない。このような問題を解決するためには、垂直方向だけではなく水平方向にも粒子の位置修正を行うように拡張し、また、衣服同士の衝突の処理にも対応する必要がある。

表1に示すように、衣服が1枚だけの場合は十分リアルタイムに処理できたが、衣服が2枚の場合はやや遅く、秒間4~5フレーム程度であった。我々は、Pixel Shaderの機能を使用することで、表面形状の変形処理全体をハードウェアで実行させることを検討している。



図 7: 生成アニメーションの例

衣服	粗いモデル			詳細なモデル		シミュレーション			曲面生成・変形				FPS
	頂点数	四角面数	三角面数	頂点数	三角面数	全体	積分	衝突	全体	PNT	衝突	変形	
ワンピース	322	267	63	10912	21528	20.4	16.0	4.6	51.6	10.2	13.3	25.8	11.1
ブラウス	362	268	133	12292	24264	23.4	18.0	6.1	66.4	14.1	17.2	33.6	4.7
パンツ	430	393	39	14975	29736								

表 1: 生成アニメーションにおける頂点・面数と処理時間。処理時間は Pentium 4 2.5 GHz の PC で計測。単位はミリ秒。

6 仮想試着システム

上記の衣服シミュレーション手法を実装し、仮想試着システムのプロトタイプを開発した。モーションキャプチャ機器として、磁気式のシステムである Ascension Tech 社製の MotionStar (16 センサ) を使用した。

利用者の骨格と用意されたキャラクターの骨格は若干異なるため、モーションキャプチャで得られた利用者の関節角度をそのままキャラクターにマッピングしただけではキャラクターの動きが不自然になってしまう。そこで、下半身の動きについては、腰の位置・向き、及び、両足首の位置・向きをキャラクターにマッピングし、キャラクターの足の関節角度は逆運動学を用いて計算した。腕を含む上半身の動きについては、利用者の関節角度をそのままキャラクターの関節角度にマッピングした。

本システムは、モーションキャプチャによるオーバーヘッドはほとんどなく、Pentium 4 (2.8 GHz) のパソコン上で秒間 13 フレーム程度で動作した。モーションキャプチャによる遅延や、生成される衣服の形状に多少の違和感はあるものの、仮想空間で衣服を身に着けて動き回るような感覚を十分に得ることができた。



図 8: 仮想試着システムのテスト中の様子

7 まとめ

本論文では、動力学シミュレーションと幾何学的な形状処理の組み合わせにより、衣服の自然なアニメーションをリアルタイムに生成する手法を提案した。また、本手法を応用した仮想試着システムについて報告した。本手法は、コンピュータゲームなどへの応用も期待される。

謝辞 本研究は、情報処理技術振興協会 (IPA) による平成 14 年度未踏ソフトウェア創造事業の補助を受けた。また、本未踏プロジェクトの実施において、東京大学の近山隆教授にはプロジェクトマネージャとして多くの有益なコメントを頂いた。ここに付記して謝意を表す。

参考文献

- [1] BARAFFE, D. and WITKIN, A. 1998. Large steps in cloth simulation. *In Proc. of SIGGRAPH 98*, 43-54.
- [2] BRIDSON, R., FEDLKIW, R., and ANDERSON, J. 2002. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. *ACM Transaction on Graphics*, 21, 3, 594-603.
- [3] CHOI, K., and KO, H. 2002. Stable but responsive cloth. *In Proceedings of SIGGRAPH 2002, ACM Transaction on Graphics*, 21, 3, 604-611.
- [4] CORDIER, F., and MAGNENAT-THALMANN, N. 2002. Real-time animation of dressed virtual humans. *In Proceedings of EUROGRAPHICS 2001, Computer Graphics Forum*, 21, 3.
- [5] DEROSE, T., KASS, M., and TRUONG, T. 1998. Subdivision surfaces in character animation. *In Proc. of SIGGRAPH 98*, 85-94.
- [6] HADAP, S., BANGERTER, E., VOLINO, P., and MAGNENAT-THALMANN, N. 1999. Animating wrinkles on clothes. *In Proceeding of IEEE Visualization 99*, 175-182.
- [7] IGARASHI, T., and HUGHES, J. F. 2002. Clothing manipulation. *In Proc. of 15th Annual Symposium on User Interface Software and Technology (ACM UIST '02)*, 91-100.
- [8] KANG, Y., and CHO, H. 2002. Bilayered approximate integration for rapid and plausible animation of virtual cloth with realistic wrinkles. *In Proc. of Computer Animation 2002*.
- [9] OSHITA, M., and MAKINOCHI, A. 2001. Real-time cloth simulation with sparse particles and curved faces. *In Proc. of Computer Animation 2001*, 220-227.
- [10] VLACHOS, A., PETERS, J., BOYD, C., and MITCHELL, J. L. 2001. Curved PN Triangles. *In Proc. of the 2001 ACM Symposium on Interactive 3D Graphics*.