

2010年度 卒業論文

弾性バネモデルを用いた布シミュレーション
における水濡れによる粘着性の表現に関する研究

指導教員：三上 浩司 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト
学籍番号 M0107495
山田 航

2010年度 卒業論文概要

論文題目

弾性バネモデルを用いた布シミュレーション
における水濡れによる粘着性の表現に関する研究

メディア学部

学籍番号： M0107495

氏名

山田 航

**指導
教員**

三上 浩司 講師

キーワード

弾性バネモデル、クロスシミュレーション、粒子法、
表面張力、物理シミュレーション

近年、ゲームや映画など様々な3DCGコンテンツにおいてその表現をより向上するための方法が研究されている。中でも、仮想空間内の布の動きを現実の布の動きに近似するよう計算を用いて求めるクロスシミュレーションは、人の衣服などをより現実的に見せるために広く利用されている。引っ張りによる布の変形などといった、布の基本的な挙動については様々な先行研究においてすでに実現がされている。また、布に水が当たることで水と布との間に相互作用が生じるといった研究も行われているが、布に水分が染み込んだ状態での挙動を表現する手法は提案されていない。そのため、コンテンツにおいて濡れた布を再現する場合は、形状の変化をあらかじめ用意したり色の変化のみで表現するなどの擬似的な表現が使われている。しかしこのようなあらかじめ用意された形状を利用する方法では、布が本来持つ複雑な挙動を再現することは出来ない。

本研究は、クロスシミュレーションにおいていまだ表現が実現できていない、濡れた布の動きを実現する方法を提案する。本手法では、基本的な布の挙動については一般に利用されている質点バネモデルをベースとしているが、布が濡れたことによって新たに生じる接触物体への粘着力を近似することで濡れた布の動きを表現した。また、布が自分自身や他の物体と接触した時その物体にさらに広い面積で張り付こうとする力が加わる現象を、布を構成する点群間で粘着力を模した力が伝染するようにしたことで実現した。本研究では、実際に本手法を用いたプログラムを作成し濡れた布に生じる特性由来の表現ができていないかを検証した。その結果、本手法を用いることで布の粘着力やそれに伴う強い摩擦力によって生じる特徴的な布のシワやたるみを伴う動きが再現できていることを示した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	1
1.2	論文構成	4
第2章	提案手法	6
2.1	布のモデル化手法	6
2.2	質点の衝突判定と位置の補正	10
2.3	粘着力の伝染	12
2.4	摩擦力の発生	13
第3章	検証と考察	15
3.1	実行結果	15
3.2	検証	16
3.3	考察	20
3.4	今後の展望	20
第4章	まとめ	22
	謝辞	23
	参考文献	24

目 次

2.1	伸長に対する接続	9
2.2	圧縮に対する接続	9
2.3	圧縮と曲げの関係	9
2.4	粘着力の伝染の様子	13
3.1	実行結果：表示画面	15
3.2	粘着力適応前	17
3.3	粘着力適応後	17
3.4	実行結果：粘着の適用前後の比較	17
3.5	実行結果：粘着面積の拡大の様子	18
3.6	粘着力によるたるみ	19
3.7	粘着部の間のたるみ	19
3.8	実行結果：粘着に伴うたるみの発生	19

表 目 次

3.1 実行環境	16
3.2 描画速度の測定結果	17

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景

近年、TV やゲームなど様々な分野で 3 次元コンピュータグラフィクス（以下 3DCG）は利用されるようになってきた。しかしハードウェア性能の向上に従い、より精密なモデリングや髪の毛 1 本 1 本が動くといった複雑な動きが可能になるとともに、その制作にかかるコストが問題となっている。そのため、近年では 3 次元形状をより簡単に作る手段やキャラクタの動作を自動で生成するといった手段が広く利用されている。例えば、デザイナーがより直感的な操作でモデリングを行えるよう現実の粘土のような方法で形状を生成出来るスカルプトモデリング [1] や、様々なパラメータを与えることで地形や樹木などのオブジェクトを自動生成するプロシージャルモデリング [2] といった技術が利用されている。また、作成した 3D 形状にアニメーションをつける際、キャラクタの動きとして現実の人間の動きをカメラで取り込みキャラクタの動きに変換するモーションキャプチャ [3] や、水や煙などの物体の複雑な動きを物理現象を近似する形で計算する、物理シミュレーション [4] といった技術の研究・利用も盛んである。

その中でも、物理シミュレーションの利用法の 1 つとして、仮想空間内での布の挙動を現実の物理法則を近似した計算を用いて求めるクロスシミュレーションがある。現実の布は、多量の繊維を糸にし平面形状になるよう編みあげることによって出来る織物や、繊維を糸にすることなくそのまま板状に固めることによる不織

布など、動物の体毛もしくは植物から得られた繊維を薄い板状に加工したものである。そのため、布は容易に変形し他の物体との接触や風によるはためき、引っ張られる事による伸びとシワの発生など様々な要因によってその形状・挙動が変化する。布の挙動には布の柔らかさや伸びやすさといった素材の持つ素材や製法を由来とする特性も影響するが、そのような性質の違いについてはパラメータの違いとして表されることが多い。

3DCGにおいて、基本的な布の力学的性質を再現した研究には次のようなものがある。伸長及び圧縮に伴う曲げを考慮し、布の変形を再現した先行研究としては Kwang ら [5] の研究や Bridson ら [6] の研究がある。布の伸びについては Kwang、Bridson の研究でもすでに実現されているが、その問題点として曲げや伸びに対する力をバネ力で近似しているため布が不自然に伸びるという点が挙げられる。そこで Rony ら [7] の研究では、布の伸びを制限しデニム生地のように伸びの生じにくい布の変形も再現した。限界以上の力で引っ張ることによって起こる布の破れについても、Napaporn ら [8] の研究において、布の破れとそれによって生じる布のほつれを表現する事の出来る布のモデル化手法を提案している。また、Kaldor ら [9][10] の研究では、布を編みこまれる糸の状態から考慮し編み方の違いによって起こる布の性質の違いや動きへの変化を再現している。

上記で述べた既存研究のように、仮想空間内における基本的な布の性質の再現についてはすでに数多くの先行研究がある。しかし布の性質は非常に多岐に渡るため、クロスシミュレーションの研究ではある一部の表現を目標としそれを再現することに特化した研究が行われている。例えば、櫻田 [11] の布の物理的な性質について述べている著書では、布は水分を含むことによりその性質が変化する事が述べられている。この文献によると、布は濡れることにより乾いている状態に比べ伸びやすくなる、柔らかくなる等布の持つ材質特有の性質が変化する。これは、布を構成する繊維に対して水分が浸透することで繊維が膨張したり、分子的な構造が変化することが原因である。このような布の材質特有の性質の違いについては、計算に用いられるパラメータの変化として表すことで乾いた状態と濡れ

た状態との変化を表現することが出来る。また、布に染み込んだ水分は、接触した物体との隙間に浸出することで表面張力を発揮する。この影響により、あたかも布自体が粘着力を発揮し接触した物体に張り付いているように見る事が出来る。そして、接触部に生じた表面張力はその粘着面積を広げるよう働くため、濡れた布は徐々に張り付いていくこととなる。また、布が粘着している部位がその粘着している位置に張り付き続けようとするため、布全体に移動が起こると結果として布が余りたるみが生じる。乾いた布の場合、接触物体に沿って布が容易に滑るため極端にたるみが生じることはない。その他にも布が自己衝突を起こすことでお互いにくっつきあい、結果として特徴的なシワが発生すると言うことが挙げられる。

上記で述べたように、布の内部に浸透した水分の影響により布は乾いた状態には無い特殊な性質を見せる。また、単純に布と水との力学的な相互作用を見ても布と水はお互いに複雑な挙動を持つ物体同士であるため、多くの人間が研究を行っている。若尾ら [12] の研究では水面に浮いた布に徐々に水が染み込むことで、水中に布が沈んでいく様子の再現を行った。Ozgen ら [13] は、水の中に沈んだ布の水流の影響を受けた際の漂うような動きを再現するための研究を行った。しかし、これらの研究では水中における水の動きのみを対象としているため、空気中における濡れた布の動きに関しては対応出来ない。原田ら [14] や Chentanez ら [15] の研究では、布と流体が相互に作用しお互いの動きに力学的に干渉する様子を再現したが、布に水が染み込む現象については対応出来ない。Lenaerts ら [16] の研究では、布への水の浸透及びそれによって生じる動きの変化についても取り扱っているが、粘着している部分の面積が表面張力により拡大していく様子や自己衝突の結果生じた自己への粘着といった表現は出来ない。

一般に布と水の相互作用を扱う研究では布と水はあくまで個別の物体として処理しているため、布が水を内部に染み込んだ状態での振る舞いを再現する手法については実現できていない。濡れた物質の外観の変化については Jenson ら [16] の研究を利用することができるが、この研究では光の透過や反射のみを取り扱ってお

り布の動きについては提案していない。Lenaerts らの研究では、スポンジのような物体への水の浸透と流出を再現しており、そのデモの中で濡れた状態の布が球の上に落ちるといった表現や雑巾のように布を絞るといった表現が行われている。しかし、濡れた布同士が触れ合い本来張り付いてる箇所が容易に滑るなど、布同士に生じる粘着については実装されていないため、新たに手法を加える必要がある。

そこで本研究では濡れた状態の布に着目し、接触した物体に粘着する振る舞いやそれに伴う布のたるみの発生を再現するため、既存の伸長や変形などの布の基本的な挙動を再現する手法に加え水濡れによって生じる粘着力を再現するための手法を提案する。そうすることで、アニメやゲームなどの動的な表現においても濡れていることを表現しつつ布らしく見える動きを再現したり、デザイナーが1つ1つ濡れた布の表現を作成することなく自動で濡れた布の形状を生成する事が出来る。

本研究では、代表的な布のモデル化手法の1つである Kwang らの質点バネモデルに着目し、その点群の動きを制御する処理として濡れた布が物体に粘着する様子を再現するための計算手法を新たに提案する。まず布の基本的な挙動を再現出来るようにするため、仮想空間内における布を点群として扱う Kwang らの手法にもとづいてモデル化した。そして、布を構成する点群の動きとして、接触した箇所に対し粘着しようとする力が発生しまた接触部の面積が広がろうとする様子を再現した。また、粘着が起きている点群に対し表面を滑ろうとする力を減衰させる事で、接触部が滑らかに滑ること無く粘着している様子を再現した。それに伴い、布に余りが生じることで特徴的なたるみが現れる様子も再現した。そして、本手法を用いたプログラムを実装し、布が濡れることで発生する粘着や布のたるみが表現できていることを示し、本手法の有用性を示した。

1.2 論文構成

本論文の構成は以下のとおりである。第2章では、本研究における布のモデル化の手法と、濡れた布の挙動を再現するための具体的な手法について述べる。第3

章では、本手法を用いたプログラムを用いて描画速度などの検証を行い、本手法が有用であるかの評価を行った。最後に、第4章では本研究のまとめと、今後の展望についてを述べた。

第 2 章

提案手法

本章では、3DCGにおける布のモデル化の方法と、本研究において実現した濡れた布の粘着力を再現するための、具体的な実装手法について説明する。2.1節では、本手法における布のモデル化の手法について、2.2節では、布の、静止物体及び己自身への衝突の検知、及びそれに伴う各質点の位置の補正の方法について、2.3節では、衝突部によって生じた粘着部が、徐々に拡大していく様子の実現方法について、2.4節では、粘着部に生じる、粘着によって起こる速度の減衰の実現方法について説明する。

2.1 布のモデル化手法

本研究では濡れた布の挙動を実現するため、まずその前段階として3DCGにおける布のモデル化を実現する。本手法では布のモデル化の手法として、Kwangら[5]の提案した質点バネモデルを参考にした。また実際の実装に関しては、越塚[17]の著書を参考とした。

本研究において用いた布のモデル化手法、質点バネモデルについて述べる。まず本手法では、布を質量を持った点の集合として表す。以降、これを質点と呼ぶ。なおこの質点は等間隔、格子状に配置している。質点同士には、伸張・圧縮に対してそれぞれ対応した接続関係を持たせ、接続関係にある質点同士の距離に応じ

て、元の距離関係に戻ろうとする力を働かせる。これにより質点同士の距離が離れたとき、つまり布に伸びが生じている時には、布の伸びやすさを係数とした元に戻ろうとする力を働かせる。質点同士の距離が近づいたとき、つまり布に圧縮が生じシワや折れ曲がりが発生している時には、布の曲がりにくさに応じて元に戻ろうとする力を働かせる。こうしてある時間における質点に加わる力の合計から質点の加速度を求めることで、十分に短い時間間隔における質点の移動後の位置を計算する。これを繰り返す事で、時間ごとの布の動き・形状を近似することが可能となる。なお、布の動きをどの程度詳細に計算するかは布の大きさに対する質点の密度と時間間隔の長さによるが、質点が増えれば増えるほど、時間間隔が短ければ短いほど処理は増えることとなる。

まず質点間が自然長よりも離れている時、つまり布に対して伸長が起きている際に質点に加わる力について説明をする。布の伸長が発生している際、布が伸び過ぎないように元に戻ろうとする力を働かせる。質点間の伸びに対応した接続関係では、対象となる質点から上下左右斜めの8方向の隣接した質点に対し接続関係を持つ。なおこの接続関係は、全ての質点が同様の接続関係を持っている。図 2.1 は布を構成する質点同士が離れすぎのを防ぐための接続関係を図示した物である。そして、伸びに対応した接続関係にある質点同士が自然長よりも離れた時、元の距離関係に戻ろうとする力をバネ力で近似することで質点に加える。元に戻ろうとする力をバネ力を用いて近似することで、ある程度の伸長を許容しつつ必要以上に布が伸び過ぎないようにすることが出来る。接続している質点との自然長を l 、布の伸びにくさをバネ定数とした任意の定数値を K 、接続している質点から力の加わる質点への方向ベクトルを \mathbf{D} とすると、質点にかかるばね力 \mathbf{T} は式 (2.1) で表すことが出来る。

$$\mathbf{T} = \begin{cases} K(|\mathbf{D}| - l) \frac{\mathbf{D}}{|\mathbf{D}|} & (|\mathbf{D}| > l) \\ 0 & (|\mathbf{D}| \leq l) \end{cases} \quad (2.1)$$

次に、質点間が自然長よりも近付いているとき、つまり布に対して圧縮が生じ

ている際に質点に加わる力について説明をする。この接続関係では、対象となる質点から上下左右斜めの8方向に対し、1つあいだを飛ばした位置にある質点に対し接続関係を持つ。なおこの接続関係は、全ての質点が同様の接続関係を持っている。図2.2は布を構成する質点同士が近づきすぎるのを防ぐための接続関係を図示したものである。布に圧縮が生じた際、布はシワを生じる、つまり折れ曲がることでその力を受け流している。そのため布の圧縮に対応した接続関係では、隣接した質点に対してではなく1つ間を飛ばした質点に対して接続をすることで、その間の質点にて曲げが生じているとみなしている。図2.3に、質点間の圧縮と曲げの関係について図示したものを示す。よって、布に圧縮が生じ質点の距離が近づいたということは、布に折れ曲がりが生じていると見なせるため、質点には曲げを元に戻そうとする力を働かせる。質点に働く力は布にどの程度の曲げが生じているかに比例するため、質点間の自然長と現在の質点間の距離からどの程度の曲げが生じているかの値を求める。これを以降、曲がり率と呼ぶ。曲がり率 c は式(2.2)で表すことができる。

$$c = \frac{2}{l} \operatorname{sinc}^{-1} \left(\frac{|\mathbf{D}|}{l} \right) \quad (2.2)$$

求められた曲がり率 c を用いて、曲げに対する布の粘り強さをパラメータ化した任意の値を R とすると、曲げに対して質点に加わる力 \mathbf{F} は式(2.3)で表すことができる。

$$\mathbf{F} = Rc^2 \left(\cos \frac{cl}{2} - \operatorname{sinc} \left(\frac{cl}{2} \right) \right)^{-1} \frac{\mathbf{D}}{|\mathbf{D}|} \quad (2.3)$$

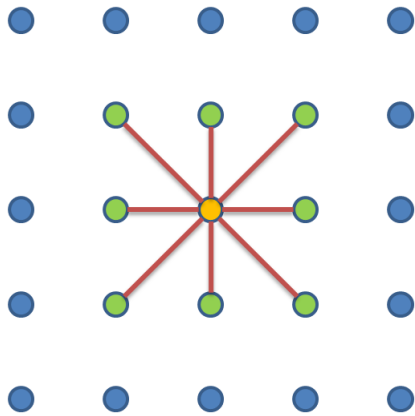


図 2.1: 伸長に対する接続

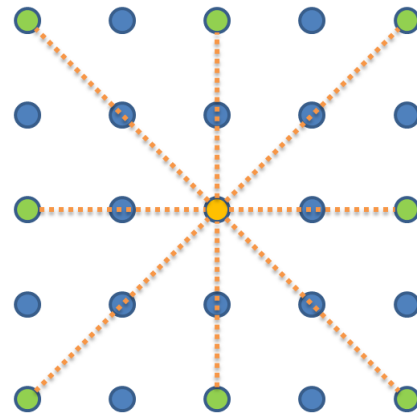


図 2.2: 圧縮に対する接続

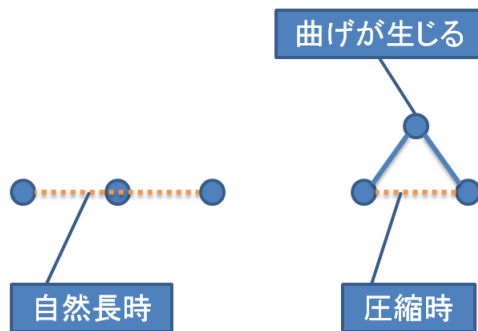


図 2.3: 圧縮と曲げの関係

以上の計算を、全ての質点とその全ての接続関係に対して繰り返し行うことで、その瞬間における質点に加わる力の合計 \mathbf{I} を求める。質点に加わる力の合計 \mathbf{I} より、十分に短い時間間隔 Δt 後の質点の座標 $\mathbf{P}(t + \Delta t)$ をベルレ法 [18] を用いることで求めた。質点の重量を m 、時刻 t における質点の座標を $\mathbf{P}(t)$ 、加わっている力の合計を \mathbf{I} とすると、時間 Δt 後の質点の位置 $\mathbf{P}(t + \Delta t)$ は式 (2.4) で表すことができる。

$$\mathbf{P}(t + \Delta t) = 2\mathbf{P}(t) - \mathbf{P}(t - \Delta t) + \left(\frac{\mathbf{I}}{m}\right) (\Delta t)^2 \quad (2.4)$$

この処理を繰り返すことによって瞬間瞬間における布を構成する質点の位置を計算し、伸びを許容しつつも不自然な曲げの発生しない布の動きを再現した。

なお、今研究での布のモデルは、縦横等間隔に格子状に質点を配置した、正方形の布としている。また、布の質点を頂点として両面のポリゴンを生成することで、布の自己衝突を検知する際の当たり判定のポリゴンとして用いた。

2.2 質点の衝突判定と位置の補正

布の粘着力とは、濡れた布が自分自身や他の物体と衝突をした結果として現れるものである。そのため、布の粘着を再現するためには、まず布と布、及び他の物体との衝突を求める必要がある。なお、物体の衝突判定については、Ericson[19]の著書や、グレゴリー [20] の著書、Kodicek[21] の著書を参考とした。

布の衝突を検知するためには、まず衝突が無いと仮定した場合の、時間 Δt 後の質点の座標を求める。この時間 Δt 後の質点の座標と現在の質点の座標との差分を求めることで、時間 Δt 間の質点の軌跡を得ることが出来る。この質点の軌跡を用いて、布を構成するポリゴン、及び干渉する可能性のある物体を構成するポリゴンとの衝突判定を行う。これにより、質点の移動する予定の位置に衝突するポリゴンがあるかが分かり、もし質点とポリゴンとの間に衝突が起きていた場合、速度を補正することで移動予定の座標の修正を行う。そして、速度を補正した後の質点の軌跡を用いて、衝突がなくなるまで衝突判定を繰り返す。以上により、布と物体との衝突を検知することが出来る。

次に、実際の詳しい処理について説明する。まず最初に、衝突が無いと仮定した場合の、時間 Δt 後の質点の位置を求める。これは、式 (2.4) をそのまま利用することが出来る。

次に、質点の移動する軌跡も求め、衝突判定を行うポリゴンとの衝突判定を行う。まず衝突判定を行うポリゴンの頂点をすべて含む平面式と、 Δt 間の質点の軌跡で出来る線分との交差判定を行う。平面とポリゴンとの交差判定は、ポリゴンの法線と、ポリゴン上の一点から線分の始点及び終点へのベクトルを利用する。線

分の始点と終点が平面の裏表に別れて存在していれば、法線と各ベクトルを内積した結果現れるスカラ値の符号が異なることを利用する。この交差判定は、ポリゴンの法線を \mathbf{N} 、ポリゴン上の1点から線分の始点へのベクトルを \mathbf{U}_s 、ポリゴン上の1点から線分の終点へのベクトルを \mathbf{U}_e とすると、式(2.5)を満たすとき、質点の軌跡を表す線分とポリゴンを内包する平面は交差している。

$$(\mathbf{N} \cdot \mathbf{U}_s)(\mathbf{N} \cdot \mathbf{U}_e) \leq 0 \quad (2.5)$$

次に、平面と線分の交差が認められた場合、線分と平面が交差する座標を求める。これには、線分の両端点と平面との距離を用いた、内分比を利用する。線分の始点の座標を \mathbf{X} 、線分の始点から終点までのベクトルを \mathbf{W} 、線分の始点から平面までの距離を d_s 、線分の終点から平面までの距離を d_e とすると、線分と平面の衝突する位置 \mathbf{C} は、式(2.6)で表すことが出来る。

$$\mathbf{C} = \mathbf{X} + \left(\frac{d_s}{d_s + d_e} \right) \mathbf{W} \quad (2.6)$$

そして、線分と平面の交差する座標が、ポリゴンを構成する頂点の内側にあれば、ポリゴンと質点は衝突している。これは、ポリゴンを構成する線分と交差する座標を外積した結果のベクトルが全て同じ方向である時、交差する座標はポリゴンの内部にある。

最後に、質点の移動ベクトルに対し、ポリゴンの法線方向の速度を減衰させることにより、ポリゴンとの衝突を回避する。これは、移動する質点とポリゴンとの間に衝突が起きていた場合、布の物体への貫通を防ぐために必要な処理である。質点の、ポリゴンに衝突しないよう補正された速度 \mathbf{V}' は、式(2.7)で表すことが出来る。

$$\mathbf{V}' = \mathbf{V} - (\mathbf{V} \cdot \mathbf{N}) \frac{\mathbf{V}}{|\mathbf{V}|} \quad (2.7)$$

ただし、補正を行った後の速度でまた別のポリゴンに対し衝突する可能性があるため、補正後の速度でもう一度同様の処理を行い、ポリゴンとの衝突を検知しなくなるまで繰り返す。以上の方法により、質点の衝突判定と、それにとりあう位置の補正を行った。

2.3 粘着力の伝染

濡れた布が接触した物体に対して粘着する力は、布の内部に染み込んだ水分が接触した物体と布との間に染み出し、表面張力により両者を共に引きあうために生じる。

現実の布では、物体と布とが接触している部位の周囲にも、布と物体との距離が極めて近く、水が隙間に溜まる部分が出る。そのため、水の表面張力の影響により、布と物体が完全に接触している場所の外縁部にも、同様に接触物体に張り付こうとする力が働くこととなる。図2.4は、現実の布の貼りつく力を表した図である。そのため、接触した部位の外縁部も同様に粘着し、またさらにその外縁部にも、時間が進むにつれ徐々に粘着部が広がっていくこととなる。

このような、接触部の周辺にも粘着力が働く様子を再現するため、3.1節において行った質点の衝突判定の際、衝突を検知した質点に対し、衝突したポリゴンの法線と平行な、ポリゴン面の方向に移動しようとする力を加える。そうすることにより、次の計算ステップの際、ポリゴン面から離れようとする力がポリゴン面へと向かおうとする力を打ち消さない限り、また同様に接触が生じる。そのため、粘着面から質点を引き剥がすような強い力が働くまで、質点には衝突物体の面に張り付こうとする力が働き続ける。なお、本研究では粘着力は任意の値を利用し、現実の実験データから得る値は利用していない。粘着力の強さを s とすると、粘着力 \mathbf{S} は式(2.8)で表すことができる。

$$\mathbf{S} = -s\mathbf{N} \quad (2.8)$$

また、衝突した質点に接続している質点に対して、質点間の距離が離れるほど減衰する、質点に働く粘着力と同方向の力を加える事により、衝突した位置の外縁部にも粘着力が伝染し、徐々に粘着が広がっていく様子を再現する。接続した頂点に加わる粘着力 O は式 (2.9) で表すことが出来る。

$$O = -\frac{s}{l}N \quad (2.9)$$

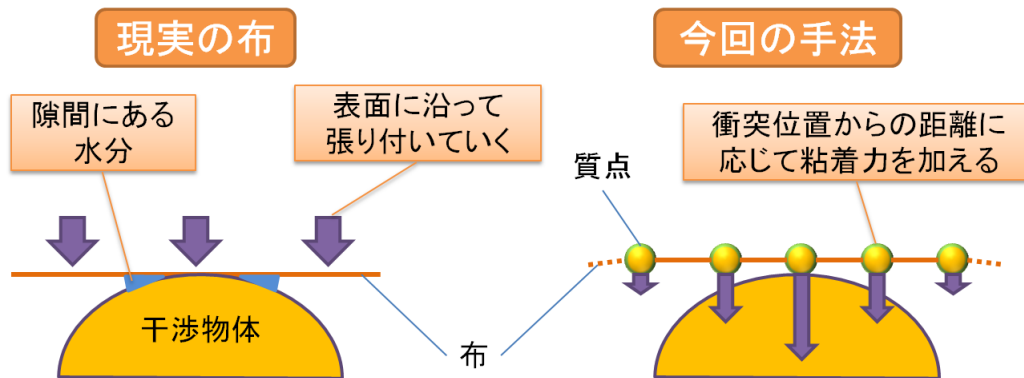


図 2.4: 粘着力の伝染の様子

2.4 摩擦力の発生

通常、布と物体の間には摩擦が生じている。しかし、特にこれが濡れた布であった場合、その粘着力と、より密着して張り付いた影響により強い摩擦が生じるようになる。

2.2 節で行った衝突判定の処理の際、衝突を検知した質点に対し、衝突を起こした事を記録しておく。そして次の計算ステップの際、同様に衝突を検知した場合、速度補正の結果として、質点は衝突面に直角な速度を持つ。そのため、衝突面に並行な速度、すなわち表面を滑ろうとする速度に対しさらに減衰を加える。この手順にて質点の速度に補正をかけることで、布の粘着に伴う強い摩擦を再現する。

摩擦力による速度の減衰率を q とすると、摩擦力の影響により減衰した質点の速度 \mathbf{V}'' は式 (2.10) で表すことが出来る。

$$\mathbf{V}'' = q\mathbf{V}' \quad (2.10)$$

第 3 章

検証と考察

本章では、第2章にて提案した手法を用いて作成したプログラムによる実行結果を示し、その検証と考察を行った。なお、本研究で作成したプログラムには3DCGを表示するフレームワークとして「FineKernelToolKitSystem」[22]を利用して実装した。

3.1 実行結果

本提案手法を用いて作成したプログラムの実行画面を図3.1に示す。

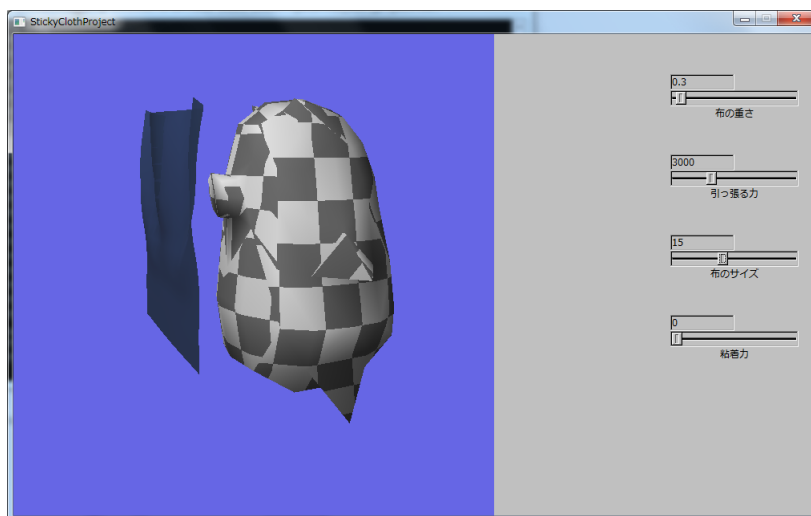


図 3.1: 実行結果：表示画面

今回の実装では、あらかじめ頂点数が114個の形状をモデラにて作成しておき、そのモデルに対して本手法を用いて作成した布を衝突させた。なお本手法における衝突では、布を構成する質点とモデルを構成するポリゴンに対してのみ行っているため、モデル形状にそのまま当たり判定を取ると布の辺や面がモデルを貫通して見えてしまう。そのため表示される形状よりも一回り大きくした同頂点数の非表示のポリゴンモデルを用意し、当たり判定として利用した。布の質点数や粘着力の大きさについては、GUIを用いて調節できるようにしている。

3.2 検証

本節では、本研究において目標とした表現が実現できているかについて、実行画面を示しつつ検証する。また、実行速度についても示し、リアルタイム性があるかどうかについても検証する。今回使用した実行環境を表3.1に示す。なお、今回のプログラムはCPUのみを計算に用いているため、GPUに関しては表記していない。

表 3.1: 実行環境

OS	Windows 7 Enterprise 64bit
CPU	AMD Phenom(tm)II X4 955 Processor 3.20GHz
メモリ	4.00GB

今回の手法では、全ての布の質点と全てのモデルを構成するポリゴンとの組み合わせに対して当たり判定を行う手法を用いている。特に布の自己衝突においては、処理が質点数に対して n^2 で増大するため、非常に処理が重くなっている。そのため参考として自己衝突の処理を無くした場合の結果と、複数のサイズの布について描画速度を測定した。なお、描画速度の単位はfps(Frames Per Second)であり、1秒間あたりの描画回数を表す。表3.2にその結果を示す。

表3.2より、頂点数が増えるにつれ処理速度が低下することが分かる。特に、自己衝突の処理を有効にした際の処理速度の低下が顕著であることが分かる。

表 3.2: 描画速度の測定結果

布の質点数	描画速度 (fps)	
	自己衝突有り	自己衝突無し
100	62	142
225	15	62
400	6	35

次に、本手法の有用性を示すため、目標とした表現とそれを実現している実行画面を示す。本研究に置いて目標とした表現が実現できていることを示すことにより、本手法の有用性を検証する。

まず、布に水がしみ込むことで生じる粘着力について、再現ができていないかを示す。濡れることによって生じる粘着力の表現を実現している実行結果として、図 3.4 を示す。図 3.2 は粘着力を考慮していない布の描画結果である。布の下端奥において、布が衝突したモデルから離れて浮いていることが分かる。図 3.3 は粘着力を考慮した場合の描画結果であり、粘着の発生によってモデルの形状に沿って布が変形していることが分かる。



図 3.2: 粘着力適応前



図 3.3: 粘着力適応後

図 3.4: 実行結果：粘着の適用前後の比較

次に、表面張力により粘着部の面積が拡大していく様子について、再現ができていないかを示す。表面張力により粘着部の面積が広がっていく表現を実現している実行結果として、図 3.5 を示す。図 3.5 より、時間と共に粘着部が徐々に広がっていく様子が示されていることがわかる。なお、この粘着部の拡大は、粘着力と布の曲がりにくさによる反力が釣り合うまで進行するため、布の柔らかさ及び粘着力の強さに比例して最終的な粘着部の面積が増えることとなる。



図 3.5: 実行結果：粘着面積の拡大の様子

また、布と物体が衝突した部分に粘着が生じることにより、張り付いていない

部分が余る場合がある。これは、濡れていない布であった場合、布が接触物体の表面を滑ることによって解消されるが、濡れて粘着した場合、粘着部が張り付いた位置に残り続けるので、布の余った部分によりたるみが生じる。図3.8は、布が粘着を起こした結果、大きなたるみが発生している状態を実現している様子である。図3.6より、布の下端が物体に張り付いた後に布全体が移動することで粘着部がその場に残り、結果としてたるみが生じていることが分かる。また、図3.7より、布の中心部が余った状態でその周囲に粘着が発生することで、中心に布の余りによって出来た大きなヒダができていることが分かる。

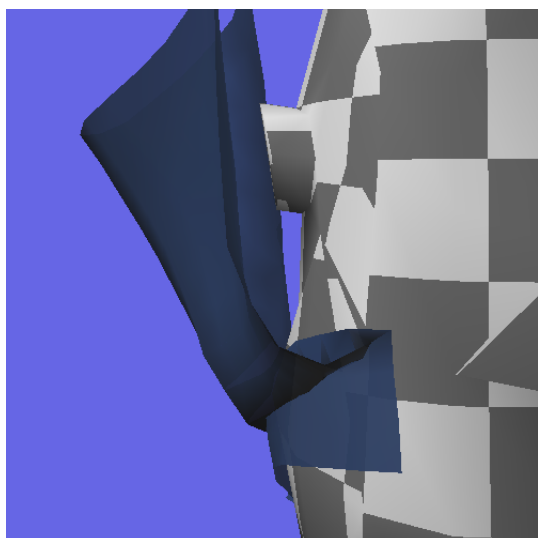


図 3.6: 粘着力によるたるみ



図 3.7: 粘着部の間のたるみ

図 3.8: 実行結果：粘着に伴うたるみの発生

以上の実行結果により、本手法を用いることで布が濡れることによって新たに生じた特徴が再現できていることが分かる。よって、本手法を用いることにより、3DCGにおいて物理的に動きが計算されている布と水が存在する場面において、布が濡れることで動きが変化することを表現することが可能になったといえる。

3.3 考察

現在の課題として、リアルタイムに本手法を利用するには、処理時間がかかりすぎているためコンテンツでの利用が難しいという点が挙げられる。特にそれは自己衝突を有効にした際において顕著であり、質点数が増えるに連れ処理が増えていることが表3.2より分かる。解決策としては、質点とポリゴンとの衝突判定を行う際、事前に処理を行う必要のない組み合わせを除外する方法が考えられる。

もうひとつの問題として、布の自己衝突に置いて貫通が起こりやすいという点である。本手法では、ポリゴンとの衝突を検知した質点に対し、衝突を起こさない位置に移動した上で、次の移動計算時にもう一度衝突を起こすよう質点に力を加えることで粘着を再現している。そのため、衝突を判定するポリゴンにも移動が生じている自己衝突において、質点の位置を補正してもポリゴンが移動することで質点を追い抜いてしまうことが起きている。その結果、一度貫通を起こしてしまうと次の衝突が起きなくなってしまう、結果として上手く粘着力が働かなくなっている。解決策としては、お互いに移動しているポリゴンと質点の衝突位置を厳密に計算する方法が考えられるが、全ての組み合わせに対して衝突判定を行っている本手法では更に処理が重くなってしまう。

そのため、処理時間と衝突の問題を同時に解決する手段として、正確な当たり判定の処理を行う前に明らかに衝突の起こらない組み合わせに対して処理を省略しつつ、貫通する位置の算出や質点の移動処理などを GPGPU などを用いて並列に処理することで、高速化する方法が考えられる。

3.4 今後の展望

今回の手法では、布に生じる粘着力やそれに伴うたるみについては実現したが、表面に生じる細かなシワや、濡れた部位の色や貼りつくことで起こる粘着部の透過などは再現できていない。そのため、小さなシワを再現するためポリゴンをより詳細に分割したり、シワを細かな凹凸として動的にテクスチャを生成すること

で再現する方法が考えられる。粘着部の色の透過についても、粘着が起きている部位の色に対して粘着を起こしている相手の色を取得して合成するなどの方法を用いてることで、より自然に見せることが出来ると考えられる。

また、今回のプログラムでは接触する物体の当たり判定を実際のモデルよりも一回り大きく設定しているが、より粘着を起こした物体の形状を正確に布に反映するということも考えられる。これに関しては、モデルの形状として細かい凹凸をテクスチャで再現している場合も考えられるため、単純なポリゴンの形状だけでなくテクスチャまでも考慮した凹凸再現が必要である。

第 4 章

まとめ

本研究では、3DCGにおける濡れた布の動きを再現するための手法を提案し、実現した。仮想空間内における布の挙動を既存の質点バネモデルの手法に基づいてモデル化しつつ、接触物体への粘着力の再現することで、濡れた布の持つ粘着力を再現した。また、触れた部位から更に粘着部が広がる様子も、布を構成する質点同士で粘着力を伝染させることで再現した。これにより乾いた布には無い、濡れた布独特の物体へ張り付く力やたるみの発生の表現が可能になった。本手法により、布の複雑な動きを再現しつつ濡れた布独特の動きも再現できるため、アニメやゲームなどの動きを伴うコンテンツにおいて、濡れた布の表現がより向上するだろう。

謝辞

本研究を終えるにあたり、手厚いご指導を頂いた渡辺大地講師と三上浩司講師に、心からの感謝の意を伝えさせていただきます技術的なサポートや論文の査読など、非常に親身に相談に乗っていただいた竹内亮太様と阿部雅樹様にも、大変感謝します。また、研究に対する様々なアドバイスや、その他研究室での生活についてのサポートなどをして頂いた院生の方々にも深く感謝致します。最後に、時に手法についての議論や、共に充実した研究生活を送った研究室のメンバーと、モニタの上でいつも癒してくれていたPEN²にも御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] EricKeller, editor. ZBrush 入門編. 株式会社ボーンデジタル, 2008.
- [2] James D. Foley, editor. コンピュータグラフィックス 理論と実践. 株式会社オーム社, 2001.
- [3] 宇佐美浩一 (編) . *CGWORLD*, 第 86 巻. 株式会社ワークスコーポレーション, 2005.
- [4] 宇佐美浩一 (編) . *CGWORLD*, 第 101 巻. 株式会社ワークスコーポレーション, 2007.
- [5] KwangJin. Stable but responsive cloth. *ACM SIGGRAPH*, 2002.
- [6] RobertBridson. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation. *ACM SIGGRAPH*, 2002.
- [7] Rony Goldenthal. Efficient simulation of inextensible cloth. *ACM SIGGRAPH*, 2007.
- [8] METAAPHANON Napaporn. ほつれを伴う布の破れのシミュレーション. *Visual Computing / グラフィックスとCAD合同シンポジウム予稿集*, 2009.
- [9] Jonathan M. Kaldor. Simulating knitted cloth at the yarn level. *ACM SIGGRAPH*, 2008.

- [10] Jonathan M. Kaldor. Efficient yarn-based cloth with adaptive contact linearization. *ACM SIGGRAPH*, 2010.
- [11] 櫻田一郎. 繊維の化学. 三共出版, 1978.
- [12] 若尾洋平. 水分の吸収を考慮した布のシミュレーション. 2005.
- [13] Oktar Ozgen. Underwater cloth simulation with fractional derivatives. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2010.
- [14] 原田隆宏. 流体と布のリアルタイム連成シミュレーション. *IPSJ SIG Notes*, 2007.
- [15] Nuttapon Chentanez. Simultaneous coupling of fluids and deformable bodies. *ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, 2006.
- [16] Henrik Wann Jensen. Rendering of wet materials. *Rendering Techniques '99*, 1999.
- [17] 越塚誠一. 粒子法シミュレーション 物理ベース CG 入本 第4版. 培風館, 2008.
- [18] 能勢修一. 計算物理学特論 分子動力学シミュレーション、数値積分法. <http://www.phys.keio.ac.jp/guidance/labs/riron/riron-lab.html>.
- [19] ChristerEricson. ゲームプログラミングのためのリアルタイム衝突判定. 株式会社ボーンデジタル, 2005.
- [20] ジェイソン・グレゴリー. ゲームエンジンアーキテクチャ. ソフトバンク クリエイティブ株式会社, 2010.
- [21] DannyKodicek. ゲームプログラミングのための数学と物理. 株式会社ボーンデジタル, 2006.

[22] 渡辺大地. FineKernelToolKitSystem. <http://www.teu.ac.jp/media/~earth/FK/>.