

修士論文

平成 24 年度 (2012)

3DCG における大気圧を考慮した
濡れた布の挙動の再現

東京工科大学大学院

バイオ・情報メディア研究科 メディアサイエンス専攻

山田 航

修士論文

平成 24 年度 (2012)

3DCG における大気圧を考慮した
濡れた布の挙動の再現

指導教員 渡辺 大地

東京工科大学大学院

バイオ・情報メディア研究科 メディアサイエンス専攻

山田 航

論文の要旨

論文題目	3DCGにおける大気圧を考慮した 濡れた布の挙動の再現
執筆者氏名	山田 航
指導教員	渡辺 大地
キーワード	クロスシミュレーション, 気圧, 気泡, 濡れ
[要旨]	<p>近年のハードウェア性能向上に伴い、ゲームや映画などの様々な映像コンテンツにおいても3次元コンピュータグラフィクス(以下3DCG)を見かけるようになった。しかしそれに伴い3DCGを用いた映像コンテンツでは、より現実に近い表現やアーティストイックな表現といった表現の質の向上が求められている。中でも、3次元空間上の物体の挙動を現実により即した動きで再現するものとして、物理シミュレーションが挙げられる。物理シミュレーションの中でも、クロスシミュレーションは3DCGコンテンツにおける布の動きを再現するためには欠かせないものである。布は変形を起こさない剛体と比べ、容易にかつ複雑な変形を起こす。そのため、コンテンツ制作者が物理現象を考慮しつつひとつひとつの布の動きを付けることは現実的ではない。従来研究では様々な布の性質を再現してきたが、布は水に濡れることで更にその性質が大きく変化をする。従来の手法で濡れた布を再現する際には、布の重さの変化として表わす方法や、接触部に擬似的な粘着力を加える方法で再現を行ってきた。しかしこれらの方法では、布と物体との隙間に残された空気塊の表現や布を引き上げることで出来る形状の再現には不十分である。本研究では、濡れた布の接触した物体に貼り付くという点と、貼り付いた布を引き上げる際に気圧差による力が生じるという点に着目をした。基本的な布の挙動をモデル化するためには質点バネモデルを利用しつつ、気圧による影響を質点に対して加えた。布と接触物体との隙間に出来た空気塊の体積変化を利用することで、布の裏表における気圧の変化を再現した。提案手法をプログラムで実装し、現実の濡れた布との比較を行うことで提案手法の有用性を確認した。</p>

A b s t r a c t

Title	Reproduce the behavior of a wet cloth considering the atmospheric pressure in 3DCG
Author	Wataru Yamada
Advisor	Taichi Watanabe
Key Words	Cloth Simulation, Pressure, Bubble, Wet Material
[summary] <p>In recent years, 3DCG graphics is utilized for various contents, such as Games or Movies, because of the performance improvement in hardware. Accordingly, improvement of expression, such as artistic expression and more realistic expression is wished in 3DCG contents. Among them, there is physics simulation, which reproduce the actual movement of the object behavior on three dimensional space. Among the physical simulation, cloth simulation is indispensable in order to reproduce the behavior of the fabric in the 3DCG content. Compared with the rigid which does not cause deformation, fabric can deform easily and complexly. Therefore, it is not practical to attach the motion considering the physical phenomena for every fabric. In previous work, various nature of the fabric has been reproduced, but the fabric will change its nature by getting wet even greater. When reproducing the wet cloth with the conventional method, suspected method has been used as the change of the fabric weight or attach adhesion force against touching parts. However in these methods, the method is insufficient to reproduce the shape caused by raising the cloth or expression of mass of air left in the gap between the fabric and the object. In this paper, I have focused on the force due to the pressure difference generated when pulling the attached cloth and the phenomenon that wet cloth stuck to touched object. While using the mass spring model in order to reproduce the behavior of the fabric, we have applied the atmospheric effect to the mass point. By taking advantage of the change of the air volume in the gap between the fabric and the object, I reproduced the change in air pressure in the two sides of the same cloth. I have confirmed the usefulness of the proposed method by implementing the proposed method in the program and performing a comparison between the actual wet cloth.</p>	

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と本研究の目的	2
1.2	論文構成	7
第2章	布の性質	8
2.1	布の種類と性質	9
2.2	水濡れによる変化	11
第3章	提案手法	12
3.1	布のモデル	13
3.2	シミュレーションの流れ	16
3.3	質点に加わる力の分析	18
3.4	気圧による力	21
3.5	気泡の体積計算	23
第4章	評価と検証	26
4.1	実装環境	27
4.2	本手法の実行結果	29
4.3	気泡の空気量による変化	32
4.4	問題点と考察	34
第5章	まとめ	35
	謝辞	37
	参考文献	39

目次

1.1	乾いた布	4
1.2	濡れた布	4
1.3	気泡の発生	5
1.4	吸着力の発生	6
2.1	布の折り方の種類. 左:平織り, 中央:綾織, 右:朱子織り	10
3.1	質点バネモデル	13
3.2	バネの接続関係	14
3.3	伸張及び圧縮に対する力の働き	15
3.4	シミュレーションの流れ	17
3.5	質点に加わる力の種類	18
3.6	垂直抗力	19
3.7	摩擦力	20
3.8	バネ力による力	21
3.9	気圧による力	22
3.10	ポリゴンごとの積分	24
3.11	布の向き判定	25
3.12	貼り付き面からの高さの積分	25
4.1	実行画面	28
4.2	張り付きの遷移	30
4.3	1点でつまみ上げた場合の比較画像.	31
4.4	2点でつまみ上げた場合の比較画像.	31
4.5	気泡の空気量= 0cm^3 の場合.	32
4.6	気泡の空気量= 400cm^3 の場合.	33

表 目 次

4.1 実行環境	29
4.2 測定結果	29

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と本研究の目的

近年のハードウェア性能向上に伴い、ゲームや映画などの様々な映像コンテンツにおいても3次元コンピュータグラフィクス(以下3DCG)を見かけるようになった。しかしそれに伴い、3DCGを用いた映像コンテンツではより現実に近い表現やアーティスティックな表現といった表現の質の向上が求められている。中でも、3次元空間上の物体の挙動を現実により即した動きで再現するものとして物理シミュレーションが挙げられる。物理シミュレーションはコンテンツ制作者が物体の動きをつける際、物体の数が数多く存在する場合や物体同士が複雑な相互作用を考慮する必要がある場合に利用する事が多い。

再現が難しい物理現象の例としては、細かいガラスの破片が多数降り注ぐような場合では動きをつけるべき物体が大量にあることとなる。一つ一つの物体の動きは比較的単純なものだが、数が膨大になることでコンテンツの制作者がひとつひとつの動きを付けることは作業量として現実的ではなくなる。特にそれぞれの物体がお互いに衝突などの相互作用を行う場合、物体の動きはより複雑なものとなる。また水のような流体の動きは水粒子の集合による挙動であるため、分離・結合を伴った形状変化を再現する必要がある。これらの例のように動きを付ける上で多くの物理作用を考慮しなければならない場合、製作者の手で動きを付けることは困難である。そのため、ある一定の物理法則に基づいた挙動を再現するには物理シミュレーションを用いることが多い。

物理シミュレーションでは剛体の動き・流体の動き・弾性体の動きに加え、それぞれの組み合わせにおける相互作用についての研究がある。その中でも弾性体シミュレーションの一種である、3次元空間内における布の挙動を再現するものはクロスシミュレーションと呼ばれる。3次元空間内における布のモデル化手法としては、弾性バネモデルを用いた手法 [1][2] や有限要素法を用いた手法 [3] が挙げられる。さらに、そのような布モデルの安定性や応答性の高さを向上するための手法 [4][5][6] も数多く研究がある。また、布のモデルに弾性バネモデルを用いる場合

には布に伸びが生じやすくなるという問題点が発生するが、Goldenら [7]はそのような布の伸びを防ぎ、デニム生地のような伸びが生じにくい布を再現する手法を提案した。

布の種類によらない共通する特徴として、布には伸長や圧縮が起こるとシワができる。このような、布に対するシワの生成についての再現手法は数多くの研究者が提案している。Rohmerら [8]は荒いメッシュによる計算とシミュレーション前の事前計算とを組み合わせることで、動的に写実的なシワの生成を行った。Wangら [9]は布に発生するシワのパターンをあらかじめデータベース化することで、シミュレーションの高速化を図った。

布の挙動をシミュレーションする上で特に問題となるのが布同士の衝突である。布は容易に変形をするため、布のある箇所が同じ布の別の箇所に対して衝突する場合がある。このような、1枚の布の中で衝突が起きることを布の自己衝突と呼ぶ。布の自己衝突を考慮する場合、布同士が衝突する場所を検知するためには布を構成する要素同士の衝突判定を行う毎回行う必要がある。そのため、衝突に備えて予め事前計算をしておくことで高速化する手法 [10] や、質点を球として扱うことで衝突判定を省略する手法 [11] が存在する。

ある特定の種類の布の性質に着目し、その性質の再現を行うことに特化した研究もある。Kaldorら [12][13][14]は、ニット生地のような編み物による布の再現を行った。この研究では、織物を構成する糸や編み込み方を考慮することで、伸長に対する特徴的な変形や写実的なニット生地の再現を実現した。

また布と剛体、もしくは布と流体との相互関係を扱った研究も多数ある。Harmonら [15]は、布が細い管を通る際のすぼんだ状態や複数の布が重なった状態を安定的に解く方法を提案した。Ozgenら [16]は水中における布の漂う挙動を再現した。Guendelmanら [17]は水流や煙などの流体と、布のような薄膜や剛体との相互作用を再現した。また、Lenartsら [18]はスポンジのような多孔性物体への水の浸潤と透過を再現した。Lenartsらの研究では布への水の浸潤も再現しており、濡れた布を絞り上げた際に搾り出される水や水が自然と布から滴り落ちる様子を再現し

た。しかし布は水に濡れることでその性質が変化し挙動にも変化が生じる [19] が、そのような濡れによる動きの変化には対応していない。

図 1.1 は乾いた状態の布を腕にかけた様子、図 1.2 は同じ布を同様の条件から濡らした状態の写真である。なお、図 1.1 と図 1.2 おいてサンプルとした布はポリエステル製のサテン織の布である。



図 1.1: 乾いた布



図 1.2: 濡れた布

2つの写真を比べると、乾いた状態に比べて濡れた状態の布の方が肌により密着していることがわかる。本稿ではこのような、濡れた布が貼り付きを起こした対象の面のことを貼り付き面と呼ぶこととする。濡れた布が密着しているのは、濡れた布が布と肌との隙間の空気を追い出したことで隙間が無くなったためである。それに伴い、肌に密着していない部分については大きなひだ状の形状として表れていることが見て取れる。図 1.3 は、上記と同じ濡れた布を平面上に置いたものである。図中の赤矢印で示した箇所において、濡れて貼り付いた布が物体との隙間に空気の塊を内包している事がわかる。布は水に濡れることで、布の織り目を水分が塞ぐとともに布全体を水の膜が包み込むことで空気が通りづらくなる。また貼り付いた布は、布と貼り付き面との隙間からの空気の侵入を防ぐ。そのようにして、濡れた布が外気を遮断することで布と貼り付き面との隙間には空気の塊が残る。このような外気と遮断した空気の塊のことを、本稿では気泡と呼ぶ。

図 1.4 は平面上に置いた濡れた布の中心部をつまみ上げたものである。図中の赤矢印で示した箇所において、布を引き上げることで貼り付き面から浮いた箇所

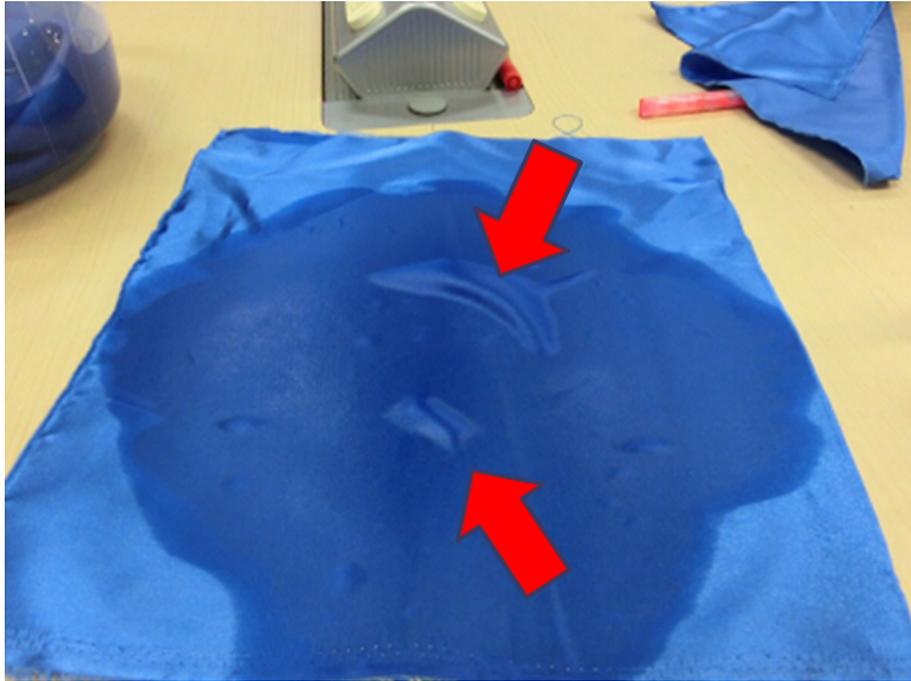


図 1.3: 気泡の発生

が布の表面から裏面にかけて凹んでいることが分かる。これは布が濡れていることで内部に空気が入ることができず、内部と生じた気圧差によって引き上げた箇所を押し付けるような力が加わったためである。

その他にも布の表面での反射が大きくなりテカリが出る、布の色が暗くなるといった外観の変化も起きている。色の変化としては白い布のような色の隠蔽力が低い布である場合、布の下の色が透けて見えるという現象も起きる。

このような布が濡れることに着目をした研究としては、Huber ら [20] の研究や Chen ら [21] の研究が挙げられる。Huber らは布に対し水が染みこんでいく際、布目を考慮することで水が繊維に沿って染みこんでいく様子を再現した。また Huber らの手法では布が他の物体と接触を起こした箇所に対し、Gascón らの手法 [22] を用いた擬似的な吸着力の再現を行なっている。Chen らの研究では布に水が染みることによって起こる重量の変化により、球に覆いかぶさった布が重みで変形していく様子を再現した。特にこの研究では布の性質や濡れた時の摩擦力などのパラメータに実測値を用いることで、より現実の布に則した形状変化を実現している。しか



図 1.4: 吸着力の発生

しこれらの手法では、布が他の物体と接触を起こしている間のみ吸着力を適応している。そのため気圧差によって生じる吸着力は考慮しておらず、布が一旦接触物体から離れてしまうと吸着力が加わらなくなる。また、布と貼り付き面との隙間にできる気泡の考慮はしていない。

以上より本研究では、濡れた布の気圧による動きの変化を考慮した布のモデル化手法を提案する。気圧によって生じる濡れた布に特徴的な形状生成を再現することで、映像コンテンツにおける濡れた布の表現をより向上することを目的とした。

本手法では濡れた布が触れた物体に貼り付く挙動の原因として、布の裏表における気圧の変化に着目した。濡れることで貼り付いた布は空気を遮断することで布と物体との隙間に気泡を生成し、気泡内部の空気量を保存する。このようにして布の隙間に出来た気泡に変形が生じた場合、気泡内部の気圧は体積変化に応じて変化する。気泡内部の内部の気圧が変化することで、気泡が生じている部分の布の裏表には気圧差が生じる。この気泡部に生じる気圧差によって布にかかる影響を考慮することで、密着状態にある布を引き上げた際の特徴的な形状変化を再

現した。

本手法では布の基本的な性質を再現するモデル化手法として、質点バネモデル [1] を利用した。質点バネモデルは、布を質量を持った点の集合を用いて離散化する。この質量を持った点のことを以降、質点と呼ぶ。質点同士を、布の縦横方向や剪断方向への変形をある程度防ぐ仮想のバネで接続した。質点間を仮想のバネで繋ぐことで、布の伸縮に対し制限がある性質や柔軟に折れ曲がる性質を再現した。そして本研究において目的とする気圧差による貼り付きの再現を行うため、布を構成する質点に対し気泡内からの気圧と大気からの気圧との差による力を与えた。気泡内の気圧は、布と吸着物体との隙間に生じた気泡の体積変化を用いることで気泡内の気圧を求めた。最後に提案手法を実装したデモプログラムを用いて現実の布とを比較した検証を行い、提案手法の有用性を確認した。

1.2 論文構成

論文の構成は以下の通りである。第2章では本研究で対象とする布全般について、その物理特性と濡れることによって起こる変化について述べる。第3章では本研究で提案する布のモデル化手法について説明する。第4章では本研究のプログラムを用い、結果の検証と考察を行う。第5章では本研究の成果と意義をまとめ、今後の展望を述べる。

第 2 章

布の性質

本章では現実の布の性質と、布が濡れることによって起きる性質の変化について述べる。2.1節では現実に存在する様々な布の種類や、布が持つ基本的な性質について述べる。2.2節ではそれらの布が水に濡れることによって起こる変化やその原因について説明する。なお、様々な布の性質に関しては櫻田氏の著書 [19] を参考とした。

2.1 布の種類と性質

布は、多数の繊維を膜状に加工したものである。布はその製造方法の違いより、織物・ニット・不織布に分けられる。また布を構成する繊維の種類や糸の太さ・織り方などの種類によっても、布の持つ性質は様々に変化する。

織物は、経糸と緯糸とを交互に織り合わせることで構成した布である。縦糸と横糸を使って編まれているため、糸の沿う方向に対し伸びやすさに異方性を持っている。ニットはいわゆる編み物であり、主に毛糸を材料として多数のループ形状を連鎖することで形成する。ニット生地は他の生地 비해、非常に伸びやすい事が特徴である。不織布は糸を用いず、多数の繊維を絡ませたり化学的に結合することで形成する。糸を用いないため繊維の方向に偏りが無く、伸びに対して異方性がない事が多い。

このように一言に布といっても様々な製法があるが、今回はその中でも織物に着目をした。また織物の中でも、基本的な織り方の種類として平織り・綾織・朱子織りがある。これらの織り方は特に三原組織と呼ばれ、それぞれの織り方により異なった性質を持つ。図 2.1 は三原組織のそれぞれ織り方を図示したものである。図中の薄い色の部分が緯糸、濃い色の部分が経糸を表している。

平織りは経糸と緯糸を交互に折り合わせた、三原組織では最も基本的な織り方である。平織りの性質には主に、引張などに対し丈夫で摩擦にも強いが布の伸縮性に乏しくシワが生じやすいという特徴がある。綾織では緯糸 1 本につき経糸を 2 本ずつ、ないしは 3 本ずつ交差させる織り方である。綾織りで織られた布は平織りに比べ、しなやかで伸縮性がありシワが寄りにくいという特徴がある。また経

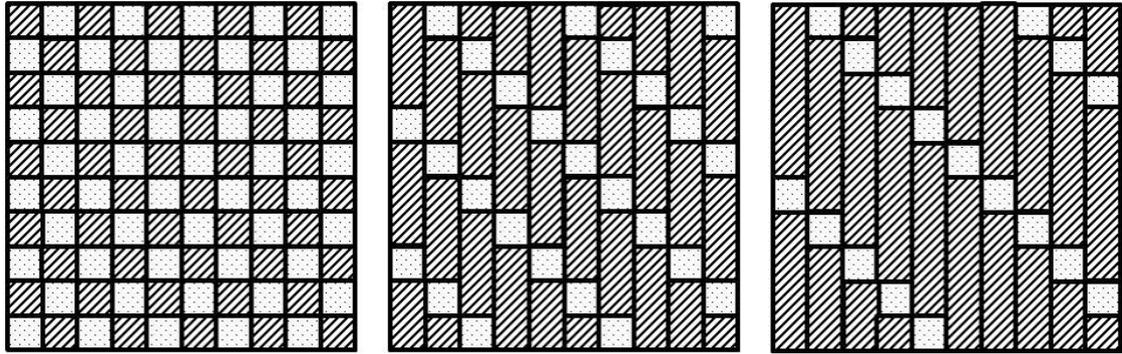


図 2.1: 布の折り方の種類. 左:平織り, 中央:綾織, 右:朱子織り

糸もしくは緯糸がより多く表側にあらわれることで、斜めに線状の模様が入るのが特徴である。朱子織りでは綾織よりもさらに経糸の露出が増え、非常に滑らかで光沢のある生地となる。しかし布の摩擦や引っ掛かりによって布が引きつれやすく、吸水性は他の織り方に比べ少ない。

布の材料としては一般に、木綿・絹・麻・ウール・アセテート・レーヨン・ナイロン・ポリエステルなどが用いられている。それぞれの繊維によって出来上がりの布の質感や風合いに違いがあり、布の用途により使い分けられている。その他にも糸の太さや織り目の細かさの組み合わせにより、布の種類は非常に多岐にわたる。また布を製品に加工する際、布の強度や滑らかさに不都合がある場合は生地裏側に接着芯を貼り付ける。このように見えない面に別の布を貼ることで、風合いを利用しつつ型くずれをしないよう布の硬さを調節することができる。

布の性質はその材質や製法によって様々に変化するが、それらに共通する代表的な性質を以下に挙げる。

- 伸長に対し、一定の制限がある。
- しなやかさに折れ曲がる。

伸張に対しての制限は、布の製法に大きく左右される。例えば平織りの布では伸びは余り生じないが、朱子織りの布の伸びが生じやすい。またニットで編まれた布の場合、本来の長さから 40 % 以上も伸びる場合もある。

2.2 水濡れによる変化

2.1 節では、製法や利用法によって様々に変化する布の性質を述べた。しかし布は水に濡れることにより、その布が持つ伸び易さやしなやかさといった性質がさらに変化する。布は大量の繊維が集まることで出来ているため、布を構成する繊維の隙間やその織り目に大量の隙間を含んでいる。そのため布に対して水分が触れることにより、水の表面張力による水分の吸収が起きる。ある種類の繊維では、繊維の隙間に水分が染み込むことで布を構成する繊維が膨張する。その結果、そのような繊維で構成した布では布の繊維が詰まることで布が固く変化する。また逆に、濡れることで柔らかく変化する繊維もある。このように、その布を構成する繊維の種類は水分の吸収に伴う布の性質の変化の仕方に大きく関係している。また、布が水分を吸収することで布全体における重量は吸収した水分量に応じて増加する。布の質量が増えると慣性の法則により、布は速度が増加しづらくなり振動も起きにくくなる。

また濡れた布の特徴として、濡れた布は接触した物体に対して貼り付くという点が挙げられる。鈴木ら [23][24][25] は、濡れた布の皮膚への張り付きの原因が水の表面張力であることを明らかにした。また、布の貼り付きが起きるに伴い布と張り付き面との間には強い摩擦力が発生する。この摩擦力の大きさには布に含まれる水分量の変化や、その布の持つ親水性や吸水力も影響する。

乾いた布にはある程度の通気性があるが、濡れた布は空気を通しづらくなる [26]。これは布の織り目や繊維の隙間に水が入り込み、空気の通り道を塞ぐためである。

第 3 章

提案手法

本章では本手法における布のモデルについてと、各質点に加わる力の計算手法について述べる。まず3.1節では本手法における布のモデルについて述べ、3.2節では手法全体におけるシミュレーションの流れを述べる。3.3節では布を構成する質点に加わる力の種類とその求め方を述べ、3.4節ではその力の内の1つである気圧による力について詳しく述べる。最後に、3.5節では気圧による力を求める際に必要となる気泡体積の計算手法について述べる。

3.1 布のモデル

本手法では布の持つ伸張に対する制限や折り曲がりといった布の性質を再現するため、質点バネモデル [1] を利用した。また、実装に関しては越塚 [27] の著書を参考とした。図 3.1 は質点バネモデルについての模式図である。

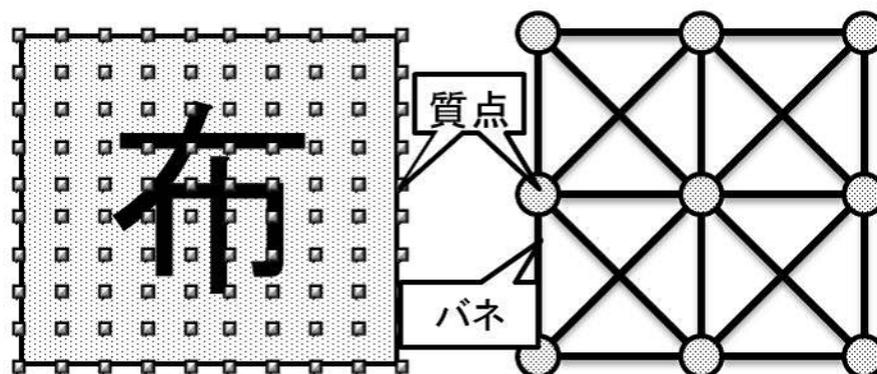


図 3.1: 質点バネモデル

本手法ではまず、3次元空間上における布を質点の集合として表わす。質点1つの持つ質量は、布全体の質量を布を構成する質点の数で等分したものとした。質点の重さはシミュレーション中で変化しないものとした。質点同士は、布の伸張や圧縮に対応した変形を実現するため近傍の質点同士を仮想のバネで接続した。質点間の距離が変化した場合、距離の変化量に応じてフックの法則に基づいたバネ力を加えた。図 3.2 はある質点から近傍の質点へと伸びるバネの接続関係を示した図である。

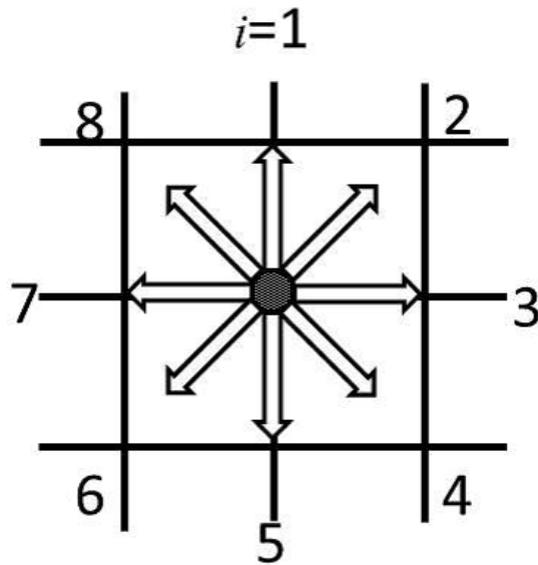


図 3.2: バネの接続関係

ある質点を中心として、質点間を繋ぐバネはその近傍の質点に対して伸ばす。これを全ての質点を中心として繰り返す。バネは始点となる質点を中心として上下左右及び斜め方向、計 8 方向の最近傍の質点に対し接続した。図中の i はある質点から伸びる複数のバネに対し、時計回りに番号をつけたものである。質点に対し横方向へのバネは現実の布における緯糸に、縦方向へのバネは経糸に相当する。斜め方向へのバネは剪断に対する抗力に相当し、現実の布の剪断方向へは変形をしやすい性質を再現するため上下左右方向へのバネに比べバネ係数を低いものとした。それぞれのバネの自然長は、そのバネが接続している質点間の距離の初期値とした。バネはフックの法則に従い質点間の距離を一定に保とうとするため伸張に対しては質点間の距離が離れ過ぎないように働き、圧縮に対しては布が折れ曲がるよう力を加える。またバネ力は質点間の距離のみに依存し角度の制限は行わないので、布の容易に折れ曲がるという性質を再現した。図 3.3 はバネの伸張と圧縮に対する、質点に加わる力の向きである。

布と物体との衝突を判定する際には各質点を球であるとみなし、衝突判定は質点同士及び質点と他の干渉物体との間のみで行った。衝突判定に用いる球の直径

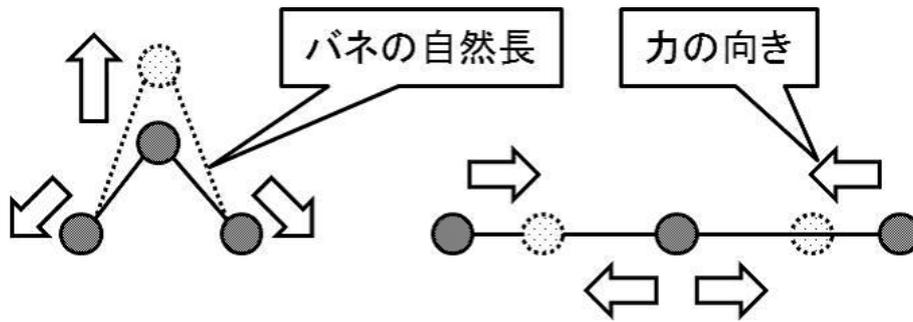


図 3.3: 伸張及び圧縮に対する力の働き

は衝突判定の安定化のため、布の厚みに対し任意のマージンを取った。

ある時刻における質点の座標 \mathbf{P}_t はベルレ法 [28] を用いることで求めた。式 (3.1) は時刻 $t + 1$ における質点の座標 \mathbf{P}_{t+1} を求める式である。

$$\mathbf{P}_{t+1} = 2\mathbf{P}_t - \mathbf{P}_{t-1} + \frac{\mathbf{F}_t}{m} \Delta t^2. \quad (3.1)$$

\mathbf{F}_t は時刻 t における質点に加わる力ベクトルの総和、 m は質点の質量である。 \mathbf{F}_t は、時刻 t における質点に加わる全ての力ベクトルを足し合わせることで求めた。質点に加わる力の種類、及び各種の力の求め方については 3.3 節にて詳しく述べる。

3次元空間内における布モデルは正方形の布であるとし、質点は布に対して等間隔の格子状として配置した。レンダリングに用いるポリゴンモデルは質点の位置を頂点とした格子を生成し、各格子を三角形ポリゴンで分割した形状を用いて描画した。

3.2 シミュレーションの流れ

本手法は、通常の質点バネモデルによる物理シミュレーションと同様の流れで処理を行う。ただし既存の手法と比較して、質点に加わる力として新たに気圧による力の影響を考慮した。まずシミュレーションの開始前に3次元空間内における布モデルと、干渉判定を行う剛体の配置を行う。布モデルの初期配置として、任意の分割数の格子形状に質点を配置することで四角形の布を生成した。布形状の生成及び干渉物体の初期配置はシミュレーション開始時に一度だけ行い、以降の処理はシミュレーションのステップごとに計算を行う。

シミュレーションのステップでは初めに、布モデルに対するユーザーからの入力を行う。これはユーザーが布に対し力を加える質点を選択し、質点を移動をしたい目的座標を入力する。次にそのステップにおける、各質点へと加わる力ベクトルの総和を求める。質点に加わる力の種類と求め方については3.3節にて詳しく述べる。ユーザーが操作を行った質点に対しては質点の現在の速度と力ベクトルを打ち消した上で、入力を行った座標へと移動するための速度ベクトルを改めて加える。現時刻における座標・速度・加速度から、次のステップにおける質点の移動予定座標を求める。移動予定である座標にて他の物体との衝突が生じていた場合は、衝突の深度に応じた力ベクトルを加えた上で改めて移動座標を求める。全ての質点の移動座標を求めた後、質点の格子形状をポリゴンメッシュにて再現した出力形状の頂点に対し対応する質点の位置を反映しレンダリングを行う。図3.4は本手法の流れを図示したものである。

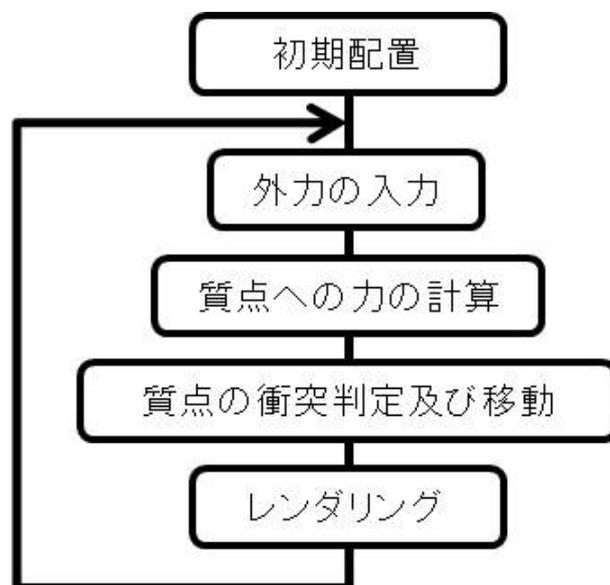


図 3.4: シミュレーションの流れ

3.3 質点に加わる力の分析

本節ではある瞬間において質点に加わる力の求め方と種類について述べる。ある時刻 t において質点に加わる力ベクトル \mathbf{F}_t は質点に加わる様々な力を合計することで求める。図 3.5 は、質点へと加わる 6 種類のカベクトルを図示したものである。

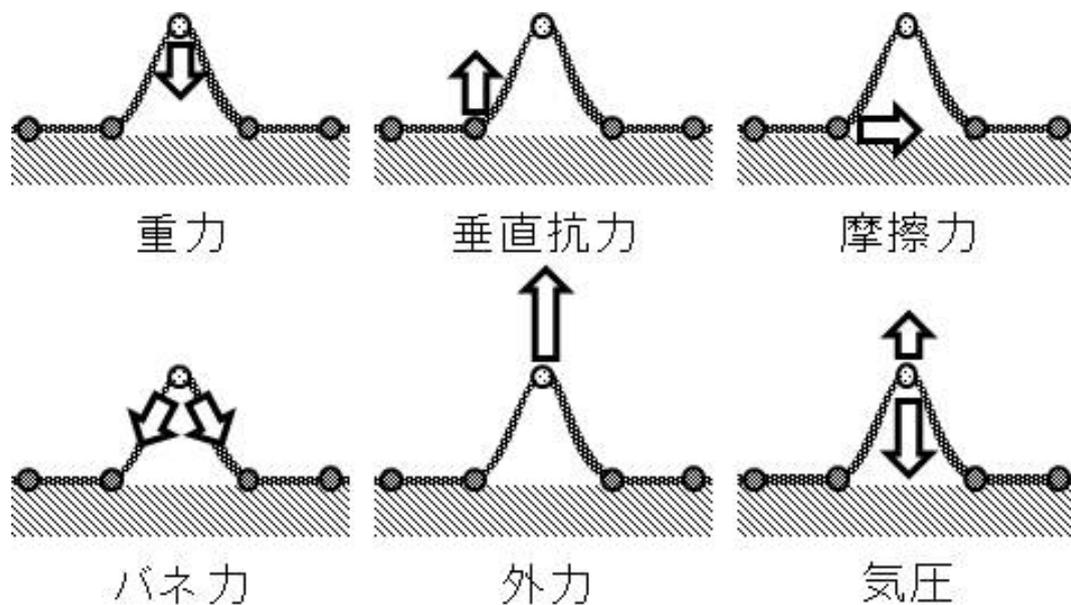


図 3.5: 質点に加わる力の種類

本手法では質点に加わる力の種類を重力 \mathbf{F}_g ・垂直抗力 \mathbf{F}_n ・摩擦力 \mathbf{F}_f ・バネ力 \mathbf{F}_s ・外力 \mathbf{F}_u ・気圧による力 \mathbf{F}_p の 6 種類とした。ある時刻 t において質点に加わる力ベクトル \mathbf{F}_t は式 (3.2) にて表わす。

$$\mathbf{F}_t = \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_n + \mathbf{F}_f + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_u + \mathbf{F}_p \quad (3.2)$$

重力によって質点に加わる力ベクトル \mathbf{F}_g は、布を構成する質点に対し常に影響し続ける力である。重力による力の大きさは質点の質量 m に比例し、式 (3.3) のように表される。

$$|\mathbf{F}_g| = m_i G. \quad (3.3)$$

m_i は質点 i における質点の質量である。 \mathbf{G} は重力加速度であり、標準重力加速度である $9.8N/kg$ とした。重力による力ベクトルの方向は、鉛直下向き方向である。

垂直抗力ベクトル \mathbf{F}_n は質点が何らかの物体に衝突した際、反作用として質点に加わる力である。垂直抗力ベクトルは、式 (3.4) のように表される。

$$|\mathbf{F}_n| = (|\mathbf{F}_g| + |\mathbf{F}_p| - |\mathbf{F}_s \sin \theta|). \quad (3.4)$$

\mathbf{F}_p は気圧により質点に加わる力、 \mathbf{F}_s はバネにより質点に加わる力である。これらの力の求め方についてはについては後々説明をする。垂直抗力による力ベクトルの向きは、質点が衝突を起こした座標における衝突物体の法線方向と等しい。図 3.6 は垂直抗力による力ベクトルを示した図である。

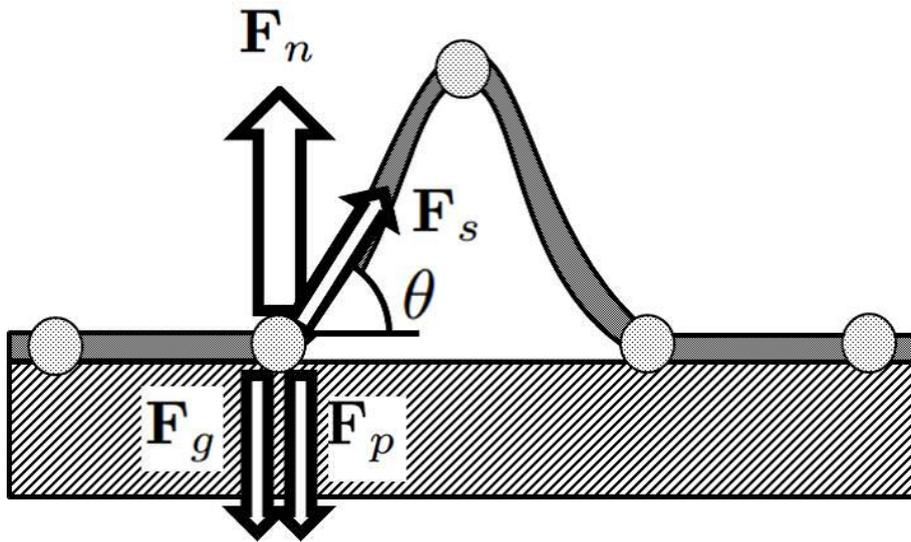


図 3.6: 垂直抗力

摩擦力 \mathbf{F}_f は質点が生他の物体面に接しているとき接触面に平行な方向に働く力であり、質点に加わる垂直抗力の大きさに比例する。本手法では摩擦係数に関して

は簡略化のため、静止摩擦係数と動摩擦係数は等しい値 μ とした。摩擦力の大きさは式 (3.5) のように表される。

$$|\mathbf{F}_f| = |\mathbf{F}_n| \mu. \quad (3.5)$$

本手法では布と接する物体として机や床のように一様な水平面を想定した。図 3.7 は質点に加わる摩擦力について図示したものである。

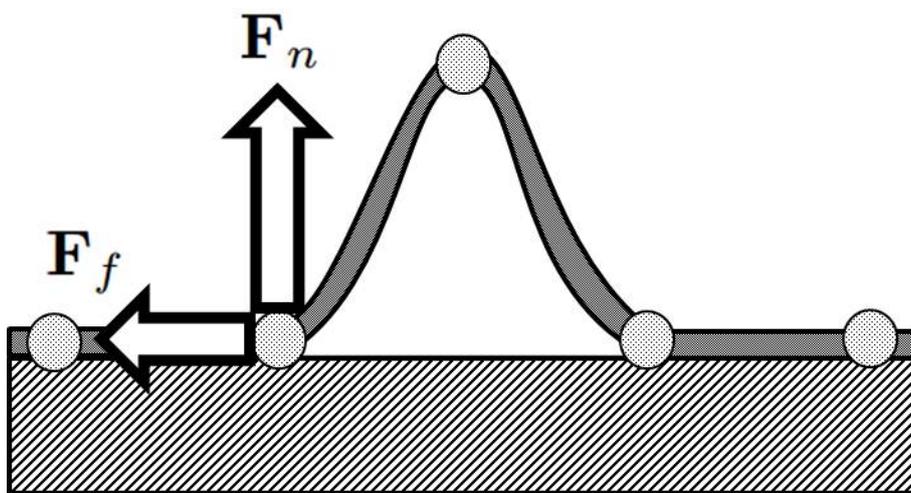


図 3.7: 摩擦力

バネ力 \mathbf{F}_s は接続関係にある質点間の距離の変化に比例したバネ力により元の距離関係に戻そうとする力である。図 3.8 は質点に加わるバネ力の数と、あるバネによって加わる力を示している。 $\mathbf{F}_{s,i}$ はある 1 つのバネから質点に加わる力、 i はある質点からバネによって繋がれた質点を示す番号、 \mathbf{D}_i は i 番目の質点へと向かう単位ベクトル、 d_i は i 番目の質点までの現在の距離、 l_i は i 番目の質点へと繋がれたバネの自然長である。本手法におけるバネモデルはフックの法則に従うものとし、そのバネ係数 k はシミュレーションが安定するような値を与えた。ある質点から伸びるバネは上下左右斜め方向最近傍 8 つの質点に対し接続しているため質点に加わる力はそれら 8 つのバネ力の総和となる。図 3.8 はある質点から伸びるバネの方向と、1 つのバネによって加わる力ベクトルを示している。質点に接続され

た複数のバネによる力ベクトルの総和 \mathbf{F}_s は、式 (3.6) のように表される。

$$\mathbf{F}_s = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{s,i} = \sum_{i=1}^n D_i k (d_i - l_i). \quad (3.6)$$

n は、バネ力を求める質点に接続されたバネの総数である。

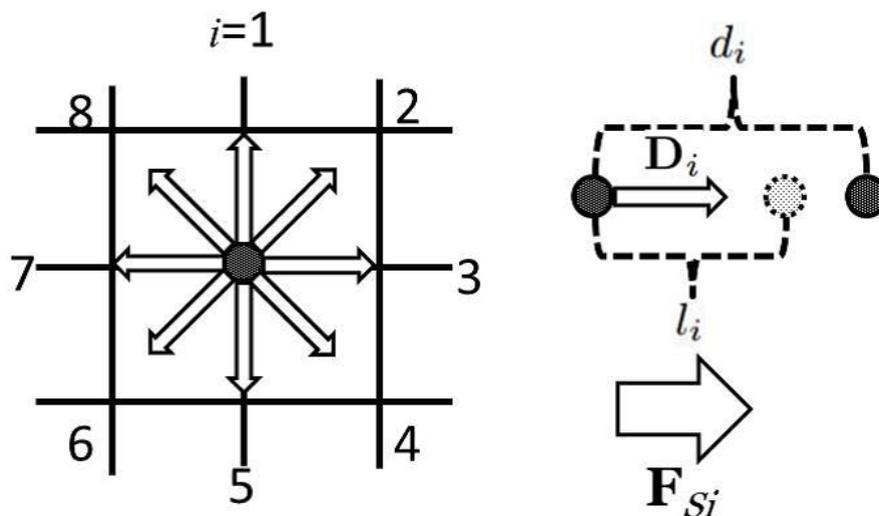


図 3.8: バネ力による力

外力 \mathbf{F}_u はユーザーが布に対して操作を行う際、質点に対しに加える力である。ユーザーは力を加える質点 ij を任意に選び次ステップにおける位置座標を入力する。気圧による力 \mathbf{F}_p については次節にて説明を行う。

3.4 気圧による力

本節では、気圧によって質点へと加わる力の求め方について述べる。提案手法では、気泡の空気量の初期値を、標準気圧における気泡の体積として与える。なお、気泡の空気量は布全体に含まれる気泡全ての合計値として扱い、気泡が布モデル中に複数存在する場合に関しては考慮していない。布全体での気泡の総空気量はシミュレーション中で変化をしないものとした。図 3.9 は、布にかかる気圧による力について、図示したものである。

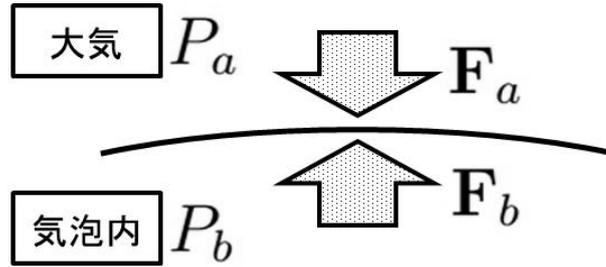


図 3.9: 気圧による力

\mathbf{F}_a は大気圧により質点に加わる力ベクトル, \mathbf{F}_b は気泡内部からの気圧により加わる力ベクトルである. P_b は気泡内部における気圧である. P_a は布の外側における気圧, つまり大気圧でありその圧力は標準気圧である 101325 パスカルとした. 気圧によって質点に加わる力ベクトル \mathbf{F}_p は次の式 (3.7) により求める.

$$\mathbf{F}_p = \mathbf{N}S(P_a - P_b). \quad (3.7)$$

S は質点 1 つあたりに相当する布の面積, \mathbf{N} は対象とする質点の座標における気泡内部から外側に向かったの布の法線ベクトルである. 今回質点 1 つ辺りの布面積 S は布モデル全体の面積の初期値を布を構成する総質点数で割ったものとし, シミュレーション中において布に変形が生じてもその値は変化しないものとした. 気泡内部にかかる気圧 P_b の初期値は大気圧 P_a に等しい大きさに設定し, 気泡の体積 v の初期値 v_0 を与えた. ボイルシャルルの法則により, 気泡内部の初期値に関して次の式 (3.8) が成り立つ.

$$p_a v_0 = K. \quad (3.8)$$

ここで K はその気泡に関する定数であり気泡内への気体の流出入と気温変化がない限り一定である. ある時刻における気泡の内圧 p_b は, 式 (3.9) によって求める.

$$p_b = \frac{K}{v}. \quad (3.9)$$

v は気泡の現時刻における体積である。ボイル・シャルルの法則により気泡内部における気圧の大きさは気泡の体積変化に反比例する。気泡の体積の計算手法については次節にて詳しく説明を行う。

3.5 気泡の体積計算

気泡の体積は布を構成するポリゴン全てに対し床面からの高さを積分することで求める。ある一つのポリゴンについて、底面からの高さを積分した体積を求めるために、ポリゴンを床面に対して投影した三角形を底辺とする三角柱を考える。三角柱の高さは、ポリゴンを構成する3つの頂点の重心の高さとする。三角柱の体積を布を構成するポリゴン全てに対し求めることで、布全体に含まれる気泡の体積を求める。なお、布を構成するポリゴンは吸着面に対して外側にあたる片面のみに配置した。気泡の体積 v は式 (3.10) によって求める。

$$v = \sum_{t=1}^m \mathbf{U} \cdot \mathbf{N}_t A_t \bar{h}_t. \quad (3.10)$$

m は布を構成するポリゴンの総数、 \mathbf{U} は垂直上向きの単位ベクトル、 \mathbf{N}_t はポリゴンの単位法線ベクトル、 A_t は三角形の面積、 \bar{h}_t は三角形を構成する頂点の高さの平均である。式 (3.10) において、 $\mathbf{U} \cdot \mathbf{N}_t A_t$ は、3次元空間上のあるポリゴン t の面積 A_t を水平面に対し射影した面積に相当する。気泡の体積計算のためこの面を底面とする三角柱を考えた。このとき三角柱の高さは三角形 t の各頂点の高さの平均値とする。この三角柱の体積を全三角形について積分した結果が気泡の体積である。図 3.10 はあるポリゴンに対し、床面に対して投影した三角形を底面とする三角柱を表わす図である。

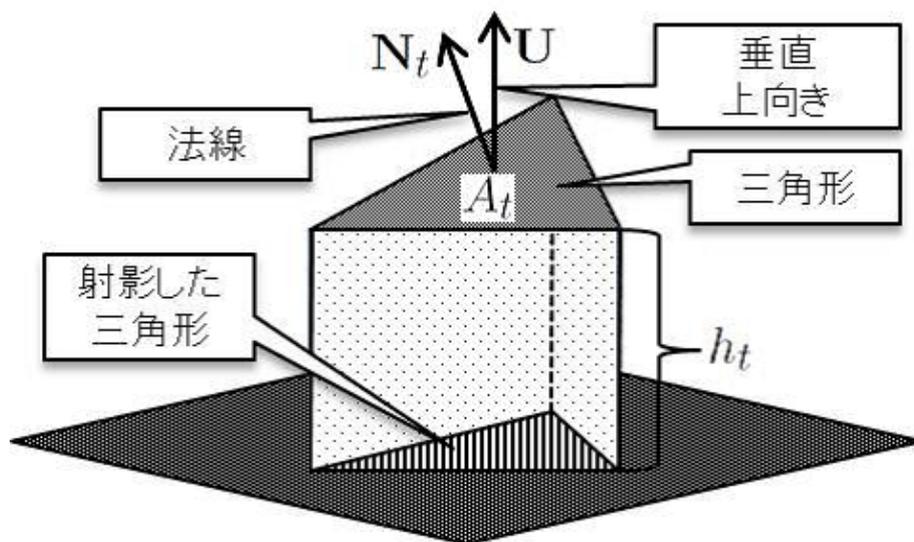


図 3.10: ポリゴンごとの積分

もしも布が折り重なるように曲がっていた場合ポリゴンを射影した三角柱が重なる部分が見れる。しかしポリゴンの法線ベクトル N_i と平面の法線ベクトル U との内積を求めることでお互いの法線のなす角が 90° を超えていた場合、つまり法線が向き合っていた場合には三角柱の体積が負の値となる。そのため式 (3.10) によって求めた全ての三角柱の体積を足し合わせることで重複した分の体積は負の体積によって打ち消されることで気泡の体積が正しく求まる。図 3.11 は布を構成するポリゴンの法線の向きにより体積の符号が変化することを図示したものである。図 3.12 はすべての三角柱の体積を足しあわせた結果気泡の体積が求まることを図示したものである。

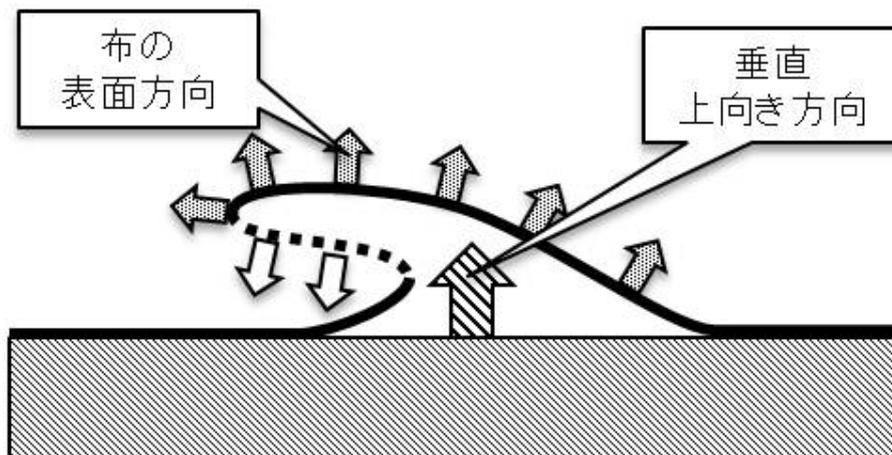


図 3.11: 布の向きの判定

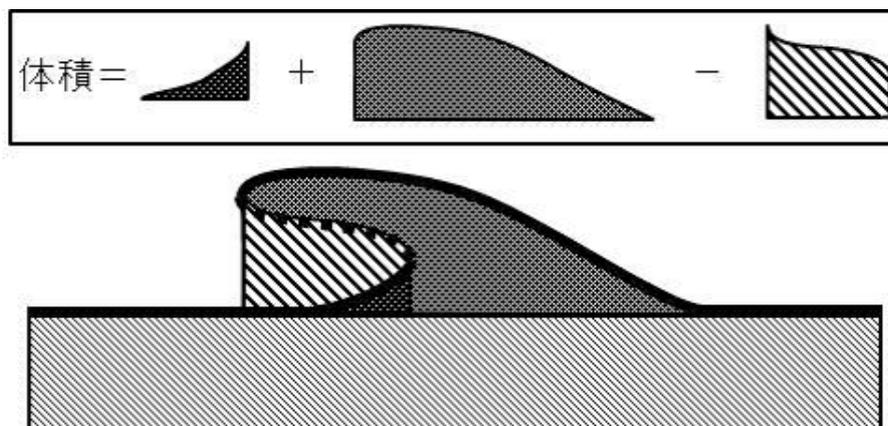


図 3.12: 貼り付き面からの高さの積分

第 4 章

評価と検証

本章では，本研究で提案した手法にを実装し，現実の布との比較を行うことでその有用性を検証する。

4.1 実装環境

本手法を適用したデモプログラムの実装にはC++を用いた。また，外部のライブラリとして物理エンジン「Bullet」[29]と，OpenGL[30]ベースの3D描画API「Fine Kernel Tool Kit System」[31][32]を用いた。なお今回の実装では，CPUでの並列化処理やGPGPUといった高速化は用いていない。布は30cm四方の正方形の布とし，布を構成する質点数は2500個とした。再現を行う現実の布のサンプルとして，ポリエステル製のサテン織布を参考とした。この布をサンプルとして用いた理由は，サテン製の布はしなやかに吸着面に沿うので空気の遮断が起きやすく吸着力が発生しやすいためである。シミュレーション中での布の伸びやすさを決定するバネ係数や，布の重さなどのパラメータは，現実の布を参考しつつ手動で設定をした。シミュレーションの安定化のため，計算を行う時間間隔は12000分の1秒とした。布が衝突し，貼り付きを起こす平面は無限遠平面とした。比較検証を行いやすくするため，デモプログラムにおける布と平面の配色は，現実の実験環境を模した配色とした。本手法を適用したデモプログラムの実行画面を図4.1に示す。

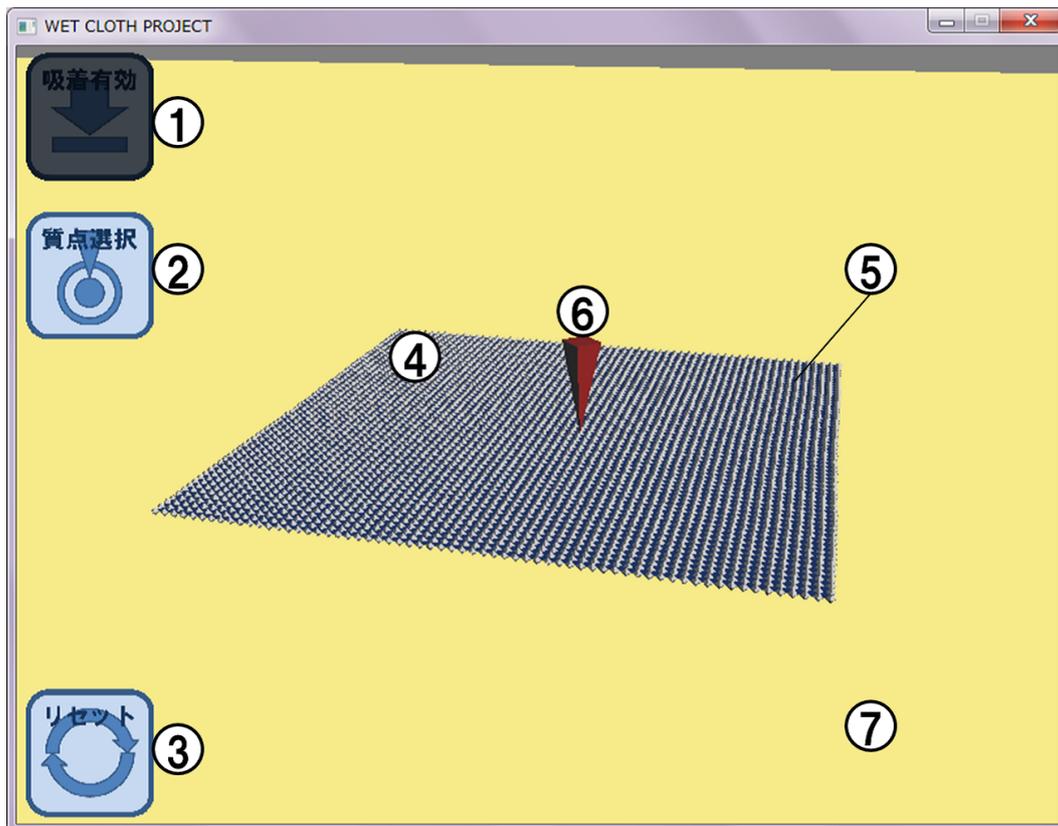


図 4.1: 実行画面

図中の1は、気圧の力の有効・無効の切り替えボタンである。図中の2は、操作する質点を選ぶための操作切り替えボタンである。アイコンが点灯中は布の質点が表示され、任意の質点をクリックすることでその質点に対し操作カーソルが現れる。図中の3は、現在の布を一度消去し、シミュレーションを初期状態に戻すための操作ボタンである。図中の4は、本研究における布モデルである。ポリエステル製・サテン織の布を模している。図中の5は、布を構成する質点である。図中の6は、ユーザーが質点を操作するためのカーソルである。ユーザーはカーソルをドラッグすることで、質点の座標を操作する形で布を引っ張る。また、ドラッグ中に右クリックを押すことでその座標に質点を固定することができる。図中の7は無限遠平面であり、布のモデルが張り付きを起こす対象である。

デモプログラムを検証したハードウェア環境について、表 4.1 に示す。

表 4.1: 実行環境

OS	Windows 7 Enterprise 64bit
CPU	Intel Core i7 3930K 3, 20G
GPU	ATI Radeon HD 5850
RAM	16, 00GB

4.2 本手法の実行結果

デモプログラムにおけるシミュレーション実行速度について、表 4.2 に示す。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 4.2: 測定結果

布の質点数	描画速度 (fps)
100	1720
400	500
900	210
1600	115
2500	64

表 4.2 より、質点数に対して処理時間が正比例的に増加していることがわかる。今回の実装においては質点数 2500 の場合において FPS は 60 前後となった。環境にも依存するが、実時間計算を求める場合は質点数は数千個が限界と考えられる。また、今回の実装では図 3.4 で示した処理ステップのうち、質点の衝突判定及び移動に最も処理時間がかかることがわかった。これは布同士の貫通を防ぐために質点数を増やした結果、自己衝突が起きる質点が多くなったためと考えられる。

本手法を用いて実装したプログラムの実行画面を図 4.2 に示す。図は左上から右下にかけて、布が動いていく様子を表した画像である。

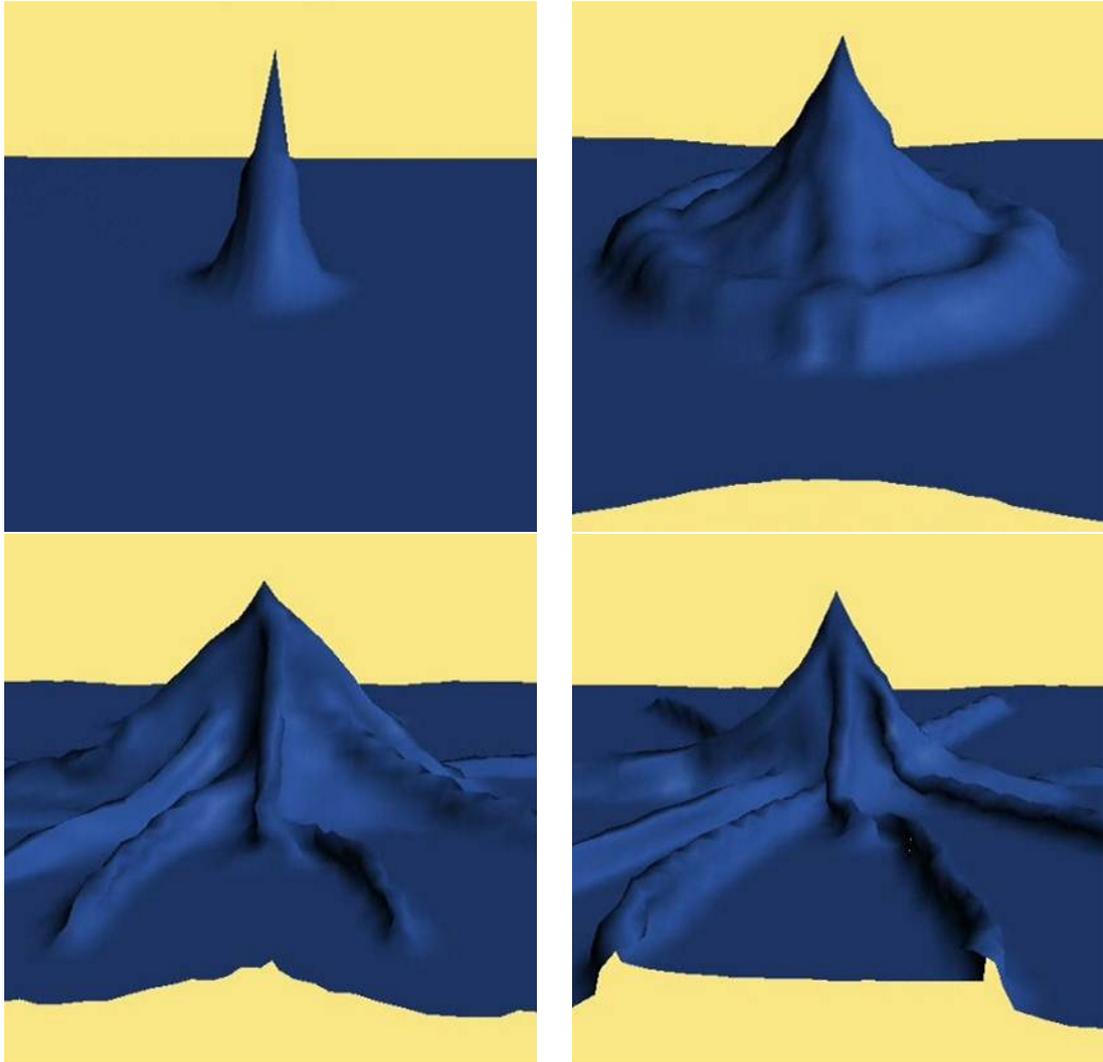
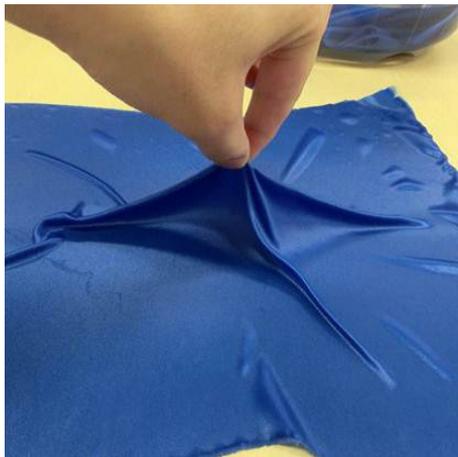


図 4.2: 張り付きの遷移

図 4.2 より，シミュレーションの時間が進むに連れて布のモデルに気圧差による貼り付きが発生していくことがわかる。

次に，現実の布と本手法におけるシミュレーション結果との比較画像図 4.3 図 4.4 を示す．実写での画像と同条件における本研究の実行結果より，濡れた布が貼り付いた際の特徴的なシワが再現できていることがわかる．特に布を 1 点でつまみ上げた場合，実写の結果と実行結果の両者において布には十字形状のひだが発生している．これは布の縦横方向に比べ，剪断方向への伸びが起きやすいことが関係していると思われる。



(a) 現実の布



(b) 実行結果

図 4.3: 1点でつまみ上げた場合の比較画像.



(a) 現実の布



(b) 実行結果

図 4.4: 2点でつまみ上げた場合の比較画像.

4.3 気泡の空気量による変化

次に、気泡内部に含まれる空気量の違いによる布の再現性について検証した。気泡の空気量が 0cm^3 の場合と 400cm^3 の場合における実行結果と、現実の布との再現度を検証した。なお、現実の布における気泡の空気量を正確に測定することは難しい。そのため、空気量 0cm^3 の場合における比較検証は空気をほぼ含まない状態の濡れた布を比較対象とした。また、空気量 400cm^3 の場合における比較検証はある程度の空気を内包した状態の布を比較対象とした。図4.5は、気泡の空気量を 0cm^3 とし布と貼り付き面との間に空気を含まない場合の比較画像である。

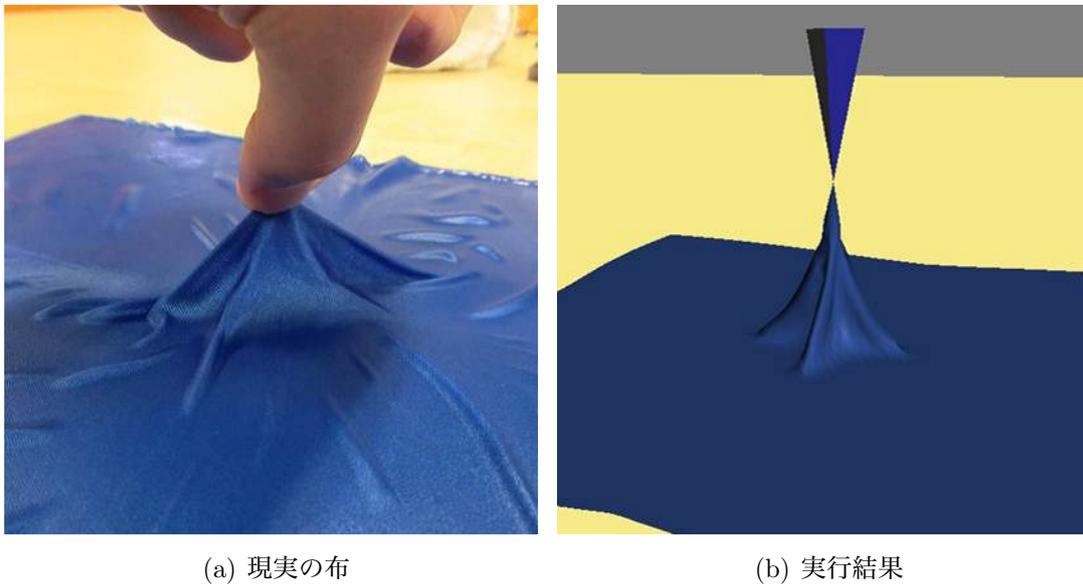


図 4.5: 気泡の空気量= 0cm^3 の場合.

図 4.5(a) は現実の濡れた布を撮影したもの、図 4.5(b) は本手法での結果画像である。図 4.5 より、布と貼り付き面との間に隙間がなく、しわが引っ張っている周囲にのみ出来ている様子が再現できた。

次に，気泡の空気量を 400cm^3 とした場合の比較画像を図 4.6 に示す．

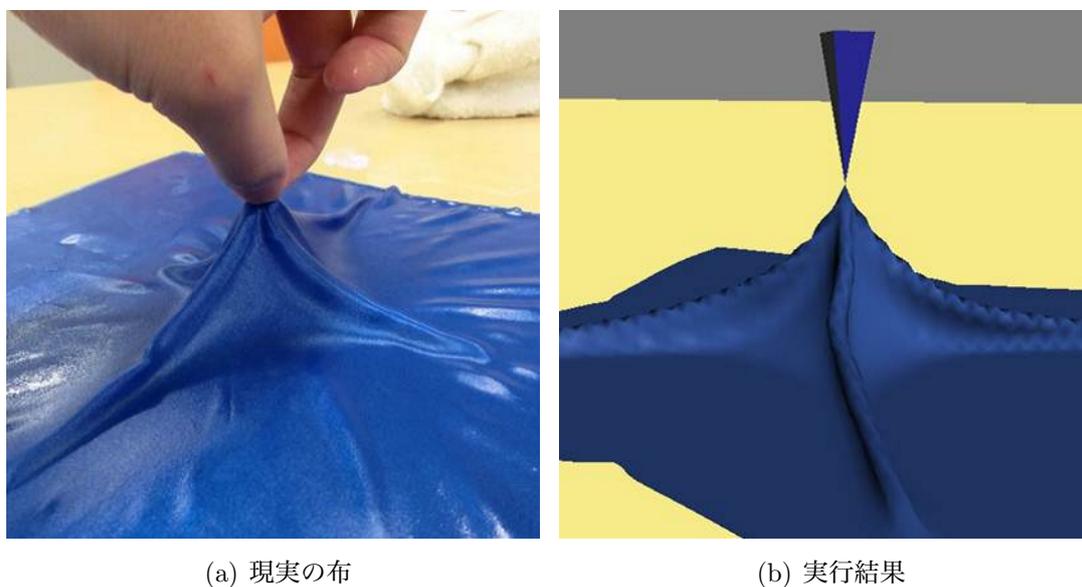


図 4.6: 気泡の空気量= 400cm^3 の場合．

図 4.6(a) は現実の濡れた布を撮影したもの，図 4.6(b) は本手法での結果画像である．図 4.6 より，貼り付き面から引き上げた事でテントのような形状が出来ることがわかる．また，気泡を含めない状態に比べ気圧による押し付ける力が弱まったことで，しわが引っ張った部位の周辺に伸びている様子が再現できた．

図 4.5 図 4.6 より，空気量の違いに応じた布の引き上げた際の形状の再現が出来ていることが分かる．ただし気泡の空気量が 0 の場合においては，現実の布よりも引っ張っている部分の伸びが大きくなっていることが分かった．これは布のモデル化として質点バネモデルを利用したため，強い力が加わることで布に現実ではありえない伸びが生じたためと考えられる．

4.4 問題点と考察

現在の問題点として、シミュレーションの安定性に欠けるという問題がある。現状ではある瞬間にかかる力をシミュレーションのステップ間隔の間、一定の力でかかり続けると仮定して質点の移動を行なっている。そのため布を素早く引き上げると強い力が本来よりも長い時間加わり続け、質点の振動や貫通・布形状の崩壊が起こることがある。気圧による力は布の重さに対して非常に大きく、また強い力が加わることでバネで接続された質点間に伸びが生じやすくなる。布の伸びを防ぐためにはバネ係数を大きくする必要があるため、質点に加わる力の総力は更に大きいものとなる。この問題の解決には、位置計算を行う時間間隔を非常に短くする方法や質点バネモデル以外のモデル化手法が考えられる。

また今回の実装ではシミュレーションの安定化のため、時間間隔に 12000 分の 1 秒という非常に短い時間をとった。これは手動で設定したパラメータを安定させるために反復的に実験を繰り返した結果の値であるが、実時間計算が必要となるコンテンツではあまり望ましくない。質点の変位の計算にはベルレ法を用いたが、ルンゲクッタ法など時間間隔における計算誤差の少ない手法や、移動計算に陰解法を用いることも有効と考えられる。

第 5 章

まとめ

本研究では、3DCGにおける大気圧を考慮した濡れた布の挙動の再現手法を提案した。濡れた布の挙動を再現するために布のモデル化手法として質点バネモデルを利用しつつ、気圧の影響により布へと加わる力を再現することで濡れた布の貼り付きを再現した。気圧による力を考慮することで従来手法では再現できなかった布と張り付き面に生じる気泡の再現と、布を引き上げた際に生じる内向きの力を再現した。本研究で提案した手法を用いることで、アニメーションやゲームコンテンツにおける濡れた布の再現をより向上させることが期待できる。

今後の展望として、より汎用的な布の形状及び衝突形状への張り付きの適用が挙げられる。本手法では平面形状への布の張り付きは実現できたが、現状の平面からの高さを積分する気泡の体積の計算方法では任意形状に対する張り付きを再現することは難しい。大気圧の力の向きに関しては布の法線方向から求めることができるが、力の大きさを求めるためには気泡の体積が必要である。そのため、任意形状への張り付きを再現するためには任意形状と変形物体との間の体積を求める必要がある。また、気泡の空気量は布が変形を起こす過程で変動することが考えられるため、より現実に近い動きを実現するためには、気泡の体積量をリアルタイムに変化させていくことが求められる。これらを実現することが出来れば、3DCGにおけるキャラクターの衣服の濡れ表現をより向上させることが期待できるだろう。また、現状の実装では布のパラメータについてはサンプルとした布を元に、それらしい動きをするよう試行錯誤的に値を設定している。布のパラメータの測定法としてはKES法 [33] が存在するが、この測定法では濡れた布の性質の変化は考慮していない。そのため現実の濡れた布をより正確に再現するためには、濡れた布の吸着性や摩擦力に関する測定法と、それをシミュレーションとして再現するモデル化手法が必要となるだろう。

謝辭

本論文を締めくくるに辺り、学部の頃から長年研究指導をしていただいた渡辺大地先生、研究のアイデアやコンテンツ利用の可能性などについて様々なアドバイスを頂いた三上浩司先生、物理現象の分析や学会での研究発表について深く指導をしていただいた柿本正憲先生に深く感謝を述べます。また、実装におけるアドバイスや研究生活についての助言をくださった先輩方や、時に手法について話し合いをした研究室の方々に感謝を致します。

参考文献

- [1] Demetri Terzopoulos, John Platt, Alan Barr, and Kurt Fleischer. Elastically deformable models. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4):205–214, August 1987.
- [2] Xavier Provot Institut and Xavier Provot. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. In *In Graphics Interface*, pages 147–154, 1996.
- [3] Nobuyuki Umetani, Danny M. Kaufman, Takeo Igarashi, and Eitan Grinspun. Sensitive couture for interactive garment modeling and editing. *ACM Trans. Graph.*, 30(4):90:1–90:12, July 2011.
- [4] David Baraff and Andrew Witkin. Large steps in cloth simulation. In *Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, SIGGRAPH '98, pages 43–54, New York, NY, USA, 1998. ACM.
- [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, David Harmon, Raanan Fattal, Michel Bercovier, and Eitan Grinspun. Efficient simulation of inextensible cloth. *ACM Trans. Graph.*, 26(3), July 2007.
- [8] Damien Rohmer, Tiberiu Popa, Marie-Paule Cani, Stefanie Hahmann, and Alla Sheffer. Animation wrinkling: augmenting coarse cloth simulations with realistic-looking wrinkles. *ACM Trans. Graph.*, 29(6):157:1–157:8, December 2010.
- [9] Huamin Wang, Florian Hecht, Ravi Ramamoorthi, and James O'Brien. Example-based wrinkle synthesis for clothing animation. *ACM Trans. Graph.*,

29(4):107:1–107:8, July 2010.

- [10] 隆宏 原田 and 誠一 越塚. 布と高解像度のモデルとのリアルタイム衝突計算 (コンピュータグラフィックス). **情報処理学会論文誌**, 48(4):1829–1837, apr 2007.
- [11] Nur Saadah Mohd Shapri and Abdullah Bade. An efficient self-collision handling between cloth surfaces based on spherical cluster technique. In *Proceedings of the 9th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry, VRCAI '10*, pages 215–220, New York, NY, USA, 2010. ACM.
- [12] Jonathan M. Kaldor, Doug L. James, and Steve Marschner. Simulating knitted cloth at the yarn level. *ACM Trans. Graph.*, 27(3):65:1–65:9, August 2008.
- [13] Jonathan M. Kaldor, Doug L. James, and Steve Marschner. Efficient yarn-based cloth with adaptive contact linearization. *ACM Trans. Graph.*, 29(4):105:1–105:10, July 2010.
- [14] Cem Yuksel, Jonathan M. Kaldor, Doug L. James, and Steve Marschner. Stitch meshes for modeling knitted clothing with yarn-level detail. *ACM Trans. Graph.*, 31(4):37:1–37:12, July 2012.
- [15] David Harmon, Etienne Vouga, Rasmus Tamstorf, and Eitan Grinspun. Robust treatment of simultaneous collisions. *ACM Trans. Graph.*, 27(3):23:1–23:4, August 2008.
- [16] Oktar, Marcelo Kallmann, Lynnette Es Ramirez, and Carlos Fm Coimbra. Underwater cloth simulation with fractional derivatives. *ACM Transactions on Graphics*, 29(3):23:1–23:9, 2010.

- [17] Eran Guendelman, Andrew Selle, Frank Losasso, and Ronald Fedkiw. Coupling water and smoke to thin deformable and rigid shells. *ACM Trans. Graph.*, 24(3):973–981, July 2005.
- [18] Toon Lenaerts, Bart Adams, and Philip Dutré. Porous flow in particle-based fluid simulations. *ACM Trans. Graph.*, 27(3):49:1–49:8, August 2008.
- [19] 櫻田一郎. **繊維の化学**. 三共出版, 1978.
- [20] Markus Huber, Simon Pabst, and Wolfgang Strasser. Wet cloth simulation. In *ACM SIGGRAPH 2011 Posters*, SIGGRAPH '11, pages 10:1–10:1, New York, NY, USA, 2011. ACM.
- [21] Yujun Chen, Nadia Magnenat-Thalmann, and Brian Foster Allen. Physical simulation of wet clothing for virtual humans. *The Visual Computer*, pages 765–774, 2012.
- [22] Jorge Gascón, Javier S. Zurdo, and Miguel A. Otaduy. Constraint-based simulation of adhesive contact. In *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA '10, pages 39–44, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2010. Eurographics Association.
- [23] 大平 通泰 鈴木 淳, 新海 克彦. 湿潤布のすべり抵抗における界面張力の作用. **繊維学会誌**, 29(2):50–56, 1973.
- [24] 鈴木 淳. 布の湿感限界水分率に関する一考察. **繊維学会誌**, 38(4):163–170, 1982.
- [25] 鈴木 淳. 高・低水分含有状態を想定したときの水分による布の密着性のモデル的検討. **繊維学会誌**, 39(6):233–245, 1983.

- [26] 都竹 初穂. 布の通気性に関する研究. **繊維製品消費科学会誌**, 29(8):340–345, 1988.
- [27] 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.
- [28] L. Verlet. Computer "experiments" on classical fluids. 1967.
- [29] Game Physics Simulation. Bullet. <http://bulletphysics.org/wordpress/>.
- [30] OpenGL.org. Opengl. <http://www.opengl.org/>.
- [31] 渡辺 大地. リアルタイムグラフィックスのためのツールキットに関する研究. 修士論文, 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科, 1996.
- [32] 渡辺大地. Finekerneltoolkitsystem. <http://www.teu.ac.jp/media/~earth/FK/>.
- [33] 川端季雄. 風合い評価の標準化と解析第2版. 1980.