

2024 年度 秋学期

卒 業 論 文

位置ベース物理法における濡れた布の リアルタイムシミュレーション

指導教員: 仲田 晋

立命館大学 情報理工学部

卒業研究 3(EF)

コース: 画像・音メディア

学生証番号: 2600210204-7

氏名: 高辻 虎太郎

目次

1. 序論	1
2. 布の PBD による表現方法と濡れた布に働く力の課題	4
2.1. PBD による布の表現	4
2.2. 濡れた布の先行研究	5
2.3. 現状の課題	7
3. 方法	9
3.1. 通気性(圧力)の変化	9
3.1.1. 方法の検討	9
3.1.2. 検討を踏まえた方法	10
3.2. 摩擦特性の変化	10
3.2.1. 方法の検討	10
3.2.2. 検討を踏まえた方法	11
4. 検証	13
4.1. パラメータ変化による形状変化が意図通りかの検証	13
4.2. 乾いた布と濡れた布の比較	23
4.3. 実物の布とシミュレーションの布の比較	24
5. まとめ	27
謝辞	28
参考文献	29

1. 序論

物理シミュレーションとは、物理現象をコンピュータにより再現する技術のことで、物体の動き、衝突、変形など現実世界での物体の相互作用を計算により求める技術である。その手法の一つとして、メッシュを用いたシミュレーションを行う位置ベース物理法(PBD)と呼ばれる手法[1]が存在する。メッシュの交点をノード、ノード同士を結ぶ直線をエッジとし、ノード間の距離などの物理的な制約条件を満たすような位置の修正を繰り返すことにより、一つの力学的な運動として物体の位置をシミュレーションすることができる手法である。特にリアルタイムで柔軟物体を再現する場合などに用いられる手法である。例えば、布や紐、軟体などのシミュレーションが挙げられ、旗の布が風になびかれて波打つ様子などをシミュレーションする場合に適している。また、ユーザの対話的な操作に対して、計算量が少ないながらも安定した実時間でのシミュレーションを実現することができる。この手法では、物体の運動方程式を積分して運動を記述するシミュレーションと比較して、大きな時間間隔での計算であっても運動が安定し、少ないコストでシミュレーションを行うことができる。

具体的には、その時点でのノードの速度と重力などの外力にもとづいて次フレームでの予測位置を計算する。そのノードがいくつかの制約を満たすよう位置を修正する操作を、すべての点が十分制約を満たす回数だけ反復して行う。このときのノードの位置と、予測位置を計算する前のノードの位置との差から計算した速度を保存する。これを、毎フレーム、各ノードに対して行うことでシミュレーションする手法により実現している。

近年、位置ベース物理法を用いて、新たにいくつかのシミュレーションが可能になったものがある。例えば、北見らによる布の折り目シミュレーションに関する研究[2]では、布の折り目という塑性変形した物体を、位置ベース物理法の曲げ応力の制約式を拡張することで、布の折り目のシミュレーションを実現した。結果、十分短い時間で折り目を確認することが可能になった。また、金山による筆記中の毛筆の穂の変形シミュレーションに関する研究[3]では、墨の量による毛束のまとまり具合と毛束が紙面に押しつけられた際の変形を位置ベース物理法にもとづく **Position Based Elastic Rods** モデル[4]を用いて変形させることシミュレーションの安定性とリアルタイムの変形を抑えることを試みた研究である。さらに、出村による流体と毛髪との相互作用を考慮した毛髪の変形過程の研究[5]では、毛髪の本数が膨大であることによる計算コストの課題を解決しながら、毛髪と水や空気などの流体との相互作用と毛髪自体の弾塑性変形を位置ベース物理法と位置ベース物理法にもとづく **Position Based Fluids(PBF)**[6]を用いて実現した。毛髪はタンパク質であり、内部には主査結合と側鎖結合が存在するが、この側鎖結合が再結合することで変形を行う。側鎖結合の種類ごとに毛髪に与える影

響力が異なるため、結合の種類に応じて重みを変えて弾性を制御するパラメータを変更することで毛髪の弾塑性変形を実現した。流体シミュレーションに関しては、PBFにより密度制約をかけることで流体シミュレーションを行った。温風などを温度変化を引き起こす風を毛髪に当てたことで起きる温度変化による塑性変形による形状記憶を確認することができた。

一方、位置ベース物理法を利用しないシミュレーションも多くの研究が存在し、例えば、Y.Feiらによる流体と布との相互作用に関する研究[7]がある。この研究では、布が液体を吸収・滴下する現象や、濡れの広がりなど、多くの相互作用について計算機上で再現した研究である。ほかにも、山田による研究[8]では、濡れた布が接触面に吸着する様子を、大気圧による気圧差により再現することを試みた。この手法により、濡れた布を引っ張ったとき特有の貼り付きの様子を再現できた。

多くの物理シミュレーションの研究により、さまざまな表現が可能になったが、リアルタイムシミュレーションでは実現されていないが質点バネモデルなどシミュレーションの安定性に欠ける手法でのシミュレーションが可能な物理現象が存在する。その一つが先ほど述べた山田による研究[8]の濡れた布の挙動再現である。

本研究の目的は、濡れた布の特徴的な挙動である張り付きと引っ張り上げた部分の内側への倒れ込みの様子をリアルタイムで再現することである。3次元のシーンにおいて布と布に接する平面が存在するとき、布が濡れていれば特徴的な張り付きと引っ張り上げた部分の内側への倒れ込みが発生する。濡れた布と乾いた布の違いは、布の通気性[9]と摩擦特性[10]の差である。通気性の変化により、布が貼り付いた面の内側と大気との間で空気が移動しづらくなり、その布を引っ張ることで内部の圧力が低下し、吸着する様子が現れる。また、摩擦力の変化により、布が面と平行な方向にも移動しづらくなり、滑りづらくなる。この両者の作用により濡れた布の貼り付きが起こる。この通気性の変化と摩擦特性の変化は布の材質や面の材質によって異なる。この変化の度合いをユーザの入力とすることで、そのパラメータをPBDの内部パラメータとし、これを、以下のようにして通気性の変化による圧力の力①と摩擦特性の変化②、③を乾いた布に行うPBDに付与したシミュレーションを行い、濡れた布のシミュレーションを実現することで、この目的を達成する。ある時点の速度に、重力による速度変化を計算して加える。さらに、圧力による速度変化も加える①。その時点の速度に合わせて、パーティクルの位置を移動する。複数回、布の満たすべき制約条件により位置を修正する。静止摩擦力により、位置を修正する②。前フレームとの位置と比較し、速度を求め、その時点での位置を記録する。動摩擦力により、速度を修正する③。これを、すべてのパーティクルに対して繰り返す。

本研究の目的が達成されると、リアルタイムでの濡れた布と面の貼り付きという相互作用をシミュレーションできるようになり、ゲームや水着の試着システムなどにおいて濡れた布による乾いた布との差を表現できるようになる。ゲームでは衣服が濡れていると

きキャラクタに貼り付くようになるため、濡れていることが視覚的にわかりやすくなるため、表現に差をつけられる。また、水着の利用時には濡れているにもかかわらず、乾いた状態でしか試着できない現状があるが、このシミュレーションシステムを利用することで、実際に利用したような濡れた水着の試着が(計算機上ではあるが)可能になる。

2. 布の PBD による表現方法と濡れた布に働く力の課題

前節で述べたように、位置ベース物理法はリアルタイムシミュレーションの主要な方法の一つである。物体の運動や変形を、物体に働くすべての力のみをもとにしてシミュレーションするのではなく、満たすべき幾何学的な位置の拘束条件、外力と速度の調整からシミュレーションを行う手法である[1]。ある物体を接続関係を持ったノードとエッジ、すなわちメッシュで表現し、そのノードを移動するのである。幾何学的な位置の拘束条件とは、距離制約や角度制約などであり、対象の物体が満たすべき条件のことである。この制約を満たすようノードの位置を操作することを、すべてのノードが十分安定するまで繰り返す。拘束条件に変換できない力、特に外力に対しては、その力に応じて速度を変更する。また、摩擦係数と反発係数に従って速度の修正を行い、シミュレーションを実行する。この手法により、物理挙動の正確性を犠牲にしながらも、誤差の小さい状態で高速で安定したシミュレーションが可能になった。一方、力学ベースのシミュレーションで実現される表現のうち、位置ベース物理法では実現されていない現象がある。本章では、位置ベース物理法による布の表現方法と、濡れた布とそうでない布の性質の差異、濡れた布が平らな面に張り付いたときの挙動の差異を述べる。

2.1. 位置ベース物理法による布の表現

位置ベース物理法による布の表現は以下の方法で行う[1]。三角形メッシュを入力とし、メッシュのノードに対してシミュレーションする。すべてのノードを初期化し、外力による速度の変更を行い、その瞬間の速度に応じて全ノードを移動する。全ノードに対して衝突制約により位置の修正を行い、十分な回数だけそれ以外の制約を繰り返し適用する。その後、前フレームとの位置の差から速度を計算する。この処理のうち、初期化を除いた部分を繰り返すことで、位置ベース物理法によるシミュレーションを実現する。なお、このシミュレーションで用いる制約は以下の三つであり、メッシュのエッジ(接続関係)に対して距離の制約(1)、曲げ制約(2)を適用し、衝突制約として自己衝突制約(3)を実装する。

$$C_{stretch}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2) = |\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2| - l_0 \quad (1)$$

$$C_{bend}(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4) = \arccos\left(\frac{(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)}{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1| \times |\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1|} \cdot \frac{(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_4 - \mathbf{p}_1)}{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1| \times |\mathbf{p}_4 - \mathbf{p}_1|}\right) - \phi_0 \quad (2)$$

$$C(\mathbf{q}, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3) = (\mathbf{q} - \mathbf{p}_1) \cdot \frac{(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)}{|\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1| \times |\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1|} - h \quad (3)$$

(1)はある二つの点の距離が初期状態と等しくなるよう布の伸び剛性を表すユーザパラメータ $k_{stretch}$ に応じてノードの位置を修正する拘束条件である。 l_0 はエッジの長さの初期値であり、 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ はある接続関係にある二つのノードの位置ベクトルである。 $k_{stretch}$ の範囲は $0 \leq k_{stretch} \leq 1$ であり、1に近づくほど位置の修正の度合いが大きくなり、0に近づくほど位置の修正の度合いは小さくなる。この拘束条件は初期状態のエッジの長さとその時点でのエッジの長さの差をとることで位置を修正を行う拘束であり、布の伸びやすさを表現しているのである。

(2)は四つの点からなる二つの平面に関して、その法線ベクトルの内積の逆余弦を用いて角度を計算し、二つの平面の角度の初期値に等しくなるよう、布の曲げ剛性を表すユーザパラメータ k_{bend} に応じてノードの位置を修正する拘束条件である。 ϕ_0 は二つの平面の角度の初期値であり、 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3, \mathbf{p}_4$ は隣り合う二つの面を作るノードである。 k_{bend} の範囲は $k_{stretch}$ と同様、範囲は $0 \leq k_{bend} \leq 1$ であり、1に近づくほど位置の修正の度合いが大きくなり、0に近づくほど位置の修正の度合いは小さくなる。この拘束条件は、その時点での二つの平面のなす角度と初期状態での二つの平面のなす角度との差を拘束条件とすることで、布の曲がりやすさを表現しているのである。

(3)は布のあるノード \mathbf{q} と衝突対象の面を構成するノード $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3$ からなる拘束条件である。ここで h は面の厚さである。 \mathbf{q} が $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3$ からなる面を通過する場合に作用する制約であり、 $\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1$ の外積を用いて法線ベクトルを求め、その法線ベクトルに $\mathbf{q} - \mathbf{p}_1$ を射影することで面と \mathbf{q} との距離を求め、面の厚さ h を通過しないよう位置を修正する。この拘束条件は、布のあるノードが、布を貫通しないための拘束条件である。

布を位置ベース物理法で表現する場合、重力による速度の変更とこれらの拘束条件を実装することでシミュレーションしている。

2.2. 濡れた布の先行研究

濡れた布の挙動はそうでない乾いた状態の布とは異なる性質を示すことが報告されている。

都竹による研究[9]では、濡れた布の通気性の特徴を考察している。円形に切り出した試料布を蒸留水に浸漬して十分湿潤させ、自然乾燥により水分率を調整した布をフラジール型通気度試験機に取り付け、試料布の表裏の圧力差 ΔP 、対応するノズル流量計の圧力差 ΔP_N を測定し実験により、「布目や編目に相当し、ベルヌーイの法則に従う係数 A と、繊維間隙や繊維系中の間隙に相当し、ポアズイユの法則に従う係数 B と対応させ、水分を含む布の通気性の特徴を考察」している。試料布の片面から吸引することで、試料布の片面には試験機内の定常状態の圧力がかかり、もう片方の面には吸引ファンによって低下した圧力がかかる状態にして通気量を計測し、考察しているのである。ベルヌーイ係数 V 、ポアズイユ係数を V' としたとき、通気量 V は式(4)となり、

試験機のノズル形状係数 K_N を用いると、ノズル流量計で得られる $V = K_N\sqrt{\Delta P_N}$ は式(5)のように表せる。したがって、通気の係数 A, B が大きければ大きいほど通気性は大きくなり、小さければ小さいほど通気性は小さくなるのである。

$$\begin{aligned} V &= \Sigma V_i + \Sigma V'_i \\ &= \sqrt{\Delta P} \Sigma K_i + \Delta \Sigma K'_i \\ &= K\sqrt{\Delta P} + K'\Delta P \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} V &= K_N\sqrt{\Delta P} = K\sqrt{\Delta P} + K'\Delta P \\ \therefore \sqrt{\Delta P_N} &= \frac{K}{K_N}\sqrt{\Delta P} + \frac{K'}{K_N}\Delta P \\ &= A\sqrt{\Delta P} + B\Delta P \end{aligned} \quad (5)$$

この研究では、係数 A, B の大小関係により、布を三つのタイプに分類し、水分率の変化と A, B の関係を明らかにした。分類は、乾燥時に $A > B$ となるノズル型の通気特性を示すフィラメント糸織物の群をタイプ I、乾燥時 $A < B$ となるカバーファクターの大きな毛管型の通気特性をもつ紡績糸織物の群をタイプ II、カバーファクターが小さく乾燥時の A 値が大きな通気特性を持つ紡績糸織物の群をタイプ III としている。タイプ I では、水分率が高くなると A 値が急激に減少し、 B 値も同様の傾向を示すが、乾燥時での B 値がもともと小さいため、 A 値の変化と比べて変化の度合いは小さい。タイプ II では、 A 値の変化は水分量に応じてなだらかに変化するものと、比較的低水分量で大きく変化するものがある。 B 値は、 A 値に比べて大きく変化する、水分量の増加により A, B の大小関係が逆転する。タイプ III では、疎水性繊維で編まれた布と親水性繊維で編まれた布により、特徴の変化が見られた。タイプ I、タイプ II と比較すると、「疎水性繊維の布はタイプ I に、親水性繊維はタイプ II に類似している」。水分を含むことで通気性が小さくなっているのである。

木下による研究[10]では、「布の水分量を変化させ、すべり摩擦力の測定」をしている。布の種類によらず、「水分率が小さい時には、すべり抵抗力はほぼ 0 であるが、ある水分率で急激に増大し、最大値をとった後、急速に減少する」。例えば、綿においては、水分率が 0%以上 70%未満のとき、すべり摩擦力はほぼ 0gf である。70%以上 120%未満のとき、すべり摩擦力が急激に大きくなり、120%で最大値 120gf をとる。120%以上 130%未満では急激に小さくなり、その変化は 80gf である。130%以上 200%未満では徐々に減少し、200%のとき 20gf のすべり摩擦力を示す。すなわち、布が水分を含むことで摩擦力が大きくなるが、水分量がある量を超えると摩擦力は低下するのである。他の素材の布においても、急激に摩擦力が大きくなりその後減少するという傾向は同じであるものの、純水ではなく界面活性剤水溶液を用いるとすべり抵抗力の最大値が低下することも明らかにされ、すべり摩擦力が水分の表面張力に依存していることを主張している。

山田による研究[8]では、濡れた布を平面上に置くと、平面上に張り付き、中心部をつまみ上げると「貼り付き面から浮いた箇所が布の表面から裏面にかけて凹んでいる」状態を、質点バネモデルを利用してシミュレーションを行っている。乾いた布との違いである「濡れた布の気圧による動きの変化を考慮した布」を再現するために「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」シミュレーションしている。この研究では、布が水分を吸収することで、「接触した物体に対して貼り付くという点」と「布と張り付き面との間には強い摩擦力が発生する」という変化を元に、挙動の原因は「気泡が生じている部分の布の裏表には気圧差が生じる」ためとしている。この変化を質量バネモデルに組み込むことで、現実の布のような「濡れた布のが貼り付いた際の特徴的なシワが再現できている」。

2.3. 現状の課題

前節では、濡れた布と乾いた布の性質の差や、挙動の違いに関する研究について紹介した。このことにより、濡れた布と乾いた布の性質、挙動の違いが明らかになった。山田の手法[8]では、シミュレーションに成功しているものの、安定性に欠けるため、シミュレーションの「時間間隔に 12000 分の 1 秒という非常に短い時間をとった」としている。そのため、「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」手法である。一方、位置ベース物理法を用いたシミュレーションでは、単純な布のリアルタイムのシミュレーションが可能でありながら、明らかになった違いである濡れた布の、通気性の変化[9]や摩擦力の変化[10]貼り付き面から浮いた部分のへこみ[8]を表現する手法が提案されていない。濡れた布が平面上に張り付いたとき、その中心部分を引き上げた状態である図 1 のような挙動を再現できていないのである。図 1 の挙動が乾いた布と異なる点は、布が平面に張り付いている点、また[8]であげられたものと同様、引き上げたことにより平面と接触していない布が内側へへこんでいる点の二つである。これらの変化を位置ベース物理法で再現するために、どのように表せばよいかを明らかにすることが課題である。



図 1 平面上にある濡れた布の中心部分を引き上げた状態

3. 方法

本章では, 濡れた布が剛体に張り付き, その状態で布の中心を引き上げた際に生じる挙動を位置ベース物理法により再現する方法を検討する. 布の中心を引き上げたとき持ち上がった部分の空間の体積を一定に保つように内側へ倒れ込む動きと, 剛体に張り付く挙動を引き起こす力を, 前章で明らかにした乾いた布と濡れた布の性質の違いをもとに表現することを目標とする. 位置ベース物理法では, 前章で述べたとおり, 布をノードとエッジで表し, そのノードの位置と速度を, 速度の変化, 速度の調節, 拘束条件の三つにより変化させる. この二つの性質の変化を, このうちの何を変更することにより実現するかを検討した. まず通気性, 圧力差により生まれる力の表現方法[8][9]を検討し, 最も適当と思われる手法の実現方法について述べる. 次に, 摩擦力の差[10]の表現方法も検討し, 通気性と同様, 最も適当と思われる手法の実現方法について述べる.

3.1. 通気性(圧力差による力)の変化

濡れた布を引き上げたときにできる空間は, 引き上げることで高さが上昇するものの, 布が濡れることで通気性が低下しているため[9], その空間の外部から内部への通気量が小さくなり, 圧力差が生じやすくなる. その圧力差が原因で, 引き上げた布が内部に倒れ込むような挙動を示す[10]. したがって, 通気性の変化は圧力差による力と言い換えることができ, この力を位置ベース物理法で表現すればよい. 次節では, 位置ベース物理法で変化させられるパラメータのうち, この力を表現するのに適したパラメータを検討し, 続く節では具体的な実装方法について述べる. すなわち, 布を表現するノードにおける, ある時刻での圧力差が原因の力を位置ベース物理法にて表現する方法を述べる.

3.1.1. 方法の検討

まずは圧力差による力を速度の変化により表す方法を検討する. 重力などの表現に速度の変化が用いられており, 幾何学的な制約である拘束条件に変換できない外力を表現する場合に利用する手法である. したがって, 圧力差による力が幾何学的な制約に変換できない場合は, この手法が適当である.

次に, 速度の調整により表現する手法である. これは, 物体との反発係数や摩擦係数に応じて調整するために用いられる手法であるが, 圧力差による力はこの二つとは異なる. ゆえに, 速度の調整により表現する手法は不適当である.

最後に, 拘束条件として表現する手法について検討する. 位置ベース物理法では, 現実世界の対象物体に働く, 向きと大きさが刻一刻と変わる内力を幾何学的な拘束条件をもとに位置を修正することで, 多くの物理現象を再現してきた. 質点バネモデルで

表されるように、布に働く内力を、距離制約により表現していることもその例の一つである。位置ベース物理法では、内部に圧力を持つ物体のシミュレーション方法が提案されている[1]が、この手法は閉じたメッシュに行う制約であるため、今回の場合に適さない。したがって、拘束条件で表現することも適さない。

以上より、圧力差による力という拘束条件に変換できない外力は、速度の変化により表現するのが適当であるといえる。次節では、この実装方法について述べる。

3.1.2. 検討を踏まえた方法

本節では、前節での検討を踏まえて圧力差による力を速度の変化により表現する手法について述べる。速度の変化はある単位時間における移動量の変化と言い換えることができ、これは力の向きと大きさにより定まるため、圧力差による力の向きと大きさを明らかにし、それに応じた速度の変化を実装すればよい。

圧力差による力の向きは、布の面に対する法線方向、内側への向きであるため、法線方向、内側への向きのベクトルを求め、そのベクトルを力の大きさの分だけスカラー倍すればよい。大きさは圧力差に依存するが、布の編み方や素材により通気性が異なる[8]ため、これはユーザパラメータとした。すなわち、圧力差による力の向きは法線方向内側への向き、大きさはユーザパラメータとして実装する。

速度の変化をこの力に応じて行えばよい。重力を速度の変化に適用する場合は、重力に比例する大きさで、鉛直下向きに速度を加えている。これと同様の手法を適用するため、ノードを法線方向内側への向きに、圧力差による力の大きさに比例する大きさで、速度を加算した。

3.2. 摩擦特性の変化

濡れた布の中心を引き上げると、布が剛体に接している面は、乾いた布を引き上げたときほど移動せず、張り付いたような挙動を示す。これは、布が濡れることで、濡れた布と平面に働く摩擦力に変化があり[10]、その摩擦力が原因で張り付いている[8]。そのうち、木下の研究[10]により、滑り摩擦力である動摩擦力に関しては変化が明らかになった。一方、静止摩擦力にどのような変化があるかは明らかになっていないものの、山田の研究[8]により、乾いた布と比べて濡れた布に働く静止摩擦力が大きいことが主張されている。この、布が濡れることによる摩擦特性の変化を、3.1.節と同様にして位置ベース物理法で表す方法について検討し、その特性の変化を実現する手法について説明する。

3.2.1. 方法の検討

本節では、位置ベース物理法にて挙動の変化を行う際の三つの手法のうち、動摩擦力・静止摩擦力を表現するのにどの方法が最も適しているかを検討する。

まずは速度の変化によりの動摩擦・静摩擦の変化を表す方法を検討する。3.1.1.節で述べたとおり、拘束条件に変換できない外力の表現に適した方法であるため、動摩擦・静摩擦を幾何学的な制約に変換できない場合は、この手法が適当である。

次に、速度の調整により表現する手法である。これは、物体との反発係数や摩擦係数に応じて調整するために用いられる手法であるため、動摩擦を表現するのに最適である。静摩擦に関しては、最大静摩擦は静摩擦係数に依存するものの、静摩擦は静摩擦係数により定まらない。これは、静摩擦係数が静摩擦が働く上限を意味しているからであり、その上限を超えない限り静摩擦は力がつり合うように働くため、この手法は適さない。

最後に、拘束条件として表現する手法について検討する。この場合の動摩擦は平面に平行な方向に働き、摩擦以外の力を原因とする運動を妨げる。したがって、動摩擦を拘束条件で表現することも不可能ではないものの、位置ベース物理法での摩擦係数に応じて定まる力の表現方法が速度の調整により表現できることが知られている[1]ため、この手法も適さない。静摩擦に関しては、最大静摩擦を超えない限り力がつり合うように働くため、静摩擦が働いている状態では移動距離が0となる。したがって、摩擦を除く力による移動距離があるしきい値より小さい場合は移動距離を0とするという幾何学的な制約で表現できる。したがって、静摩擦は、この手法で実装できる。

以上より、動摩擦の変化については速度の調整により表現する手法が適切であり、静摩擦を拘束条件として適用するのが適当である。

3.2.2. 検討を踏まえた方法

本節では、前節での検討を踏まえて動摩擦の実装方法を述べ、次に静摩擦を表現する手法について述べる。

動摩擦は運動を妨げる向きに働く。よって、速度の大きさを小さくするよう調整すればよい。本稿で提案するシミュレーションでは、簡単のために、速度を小さくする場合、速度が0でない限り一定とする。したがって、速度を以下の式(6)のように調整すればよい。ただし、 \mathbf{v} は速度、 f_k は動摩擦により調整する速度の変化の大きさである。(6)の式で速度を調整する場合、 $|\mathbf{v}| < f_k$ のとき速度の向きが逆になる。これを避けるために、式(7)も必要である。これにより、動摩擦は実装できる。

$$\mathbf{v} = \mathbf{v} - f_k \frac{\mathbf{v}}{|\mathbf{v}|} \quad (6)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{0} \quad (|\mathbf{v}| < f_k) \quad (7)$$

静摩擦はある物体が対象と接している面に働く摩擦であり、その対象との速度差が0であるときであって、最大静摩擦を超えない限り、力がつり合うように働く。

すなわち、対象との速度差が**0**であることを維持するよう働く力である。これを拘束条件として実装する。まず、拘束条件が働くのは、対象と接しており、対象との速度差が**0**であるときである。また、現実世界において、最大静止摩擦力を超えない限り、他の運動の要因とつり合うよう働く力であるため、この拘束条件を適用するのは、他の拘束条件の適用後とすればよい。したがって、接している剛体との接触判定を行い、その剛体との速度差が小さく、相対的な位置の変化があるしきい値より小さい場合、前フレームでの位置を現フレームでの位置とする拘束条件を与えればよい。

4. 検証

本性では、3章で説明した方法で実装したシミュレーションが意図通りの挙動を示すかの検証を行う。まず、圧力差による力の実装により、引き上げた部分が内側に倒れ込むような挙動を示し、摩擦力の実装により、平面に接している部分が張り付いたような挙動を示すかどうかを検証する。この検証では、圧力差による力、摩擦力をそれぞれ徐々に大きくなるようパラメータを変更し、どの程度形状変化に差が生まれるかを検証した。また、差の視認性のために、3D シミュレーションだけでなく 2D シミュレーションも行った。次に、これらの力の実装前と実装後の差が明らかになるよう実装前後を比較する。最後に、現実世界における濡れた布の振る舞いと本稿で提案するシミュレーション手法による濡れた布の振る舞いを比較する。

4.1. パラメータ変化による形状変化が意図通りかの検証

本節では、前章で述べた通気性の変化を原因とする圧力差による力の変化と摩擦力の変化により、意図したような、引っ張った布の内側への変形と、布の接触面への張り付きを実現できているかを検証する。ここでは、ノードとエッジを確認するために、2D でのシミュレーションでは20個のノードとそれらをつなぐ 10 個のエッジを、3D でのシミュレーションでは4角形メッシュとして 441 個のノードと、それらをつなぐ 400 個のエッジを用いてシミュレーションを行った画像を並べたものである。どちらも $y = 0$ に剛体を配置し、その上に布を配置し、布全体のうち、中心となるノードの y 座標を次第に大きくしていくことで、濡れた布が剛体に張り付いている状態で、中心を引き上げた挙動のシミュレーションを行った。なお、位置ベース物理法で布を表現する際に与えられる距離拘束と重力による速度変化に加え、通気性の変化による圧力差が原因となる力を表す速度の変化と、摩擦特性の変化による動摩擦力を速度の調整、静止摩擦力を拘束条件として適用している。このうち、圧力差による力の大きさをに比例するパラメータを変化させた場合、濡れた布を引き上げた際の剛体から引き剥がされた部分が内側に倒れ込む挙動が再現できているかを検証し、摩擦力の大きさをに比例するパラメータを変化させた場合に濡れた布が剛体に接している部分が剛体からみて移動せず、張り付いた挙動になるかどうかを検証する。2D でのシミュレーションを行い、同様の検証を 3D でのシミュレーションを行う。

2D でのシミュレーションは以下の図に示したとおりである。この図は、0.2 秒ごとに撮影した。圧力パラメータを 0 から 1 まで 0.25 ずつ変化させた場合の挙動の変化を図 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, 4.1.5 に示し、摩擦パラメータを 0 から 1 まで 0.25 ずつ変化させた場合の挙動を図 4.1.6, 4.1.7, 4.1.8, 4.1.9, 4.1.10 に示した。どちらも、実時間で 0.2 秒ごとに撮影した画像である。圧力の変化は、パラメータが大きくなれば

大きくなるほど、引っ張った布が内側へへこむ挙動を示していることが明らかである。一方、摩擦パラメータの変化に関しては、張り付きとしての変化はあまり明確でないものの、横方向の移動が制限されている様子がわかる。この 2D のシミュレーションの結果からは、圧力パラメータの変化は意図したとおりの挙動となり、摩擦パラメータの変化は意図した挙動かどうか判別できない結果となった。

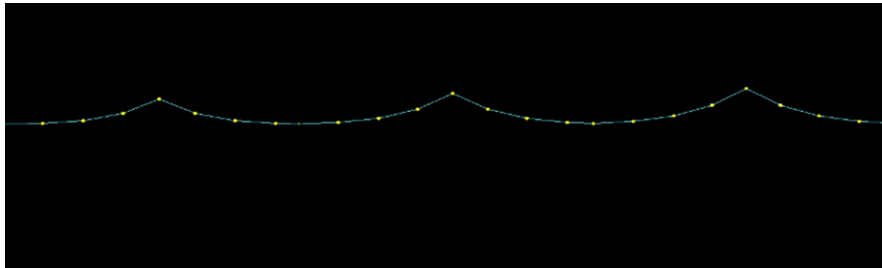
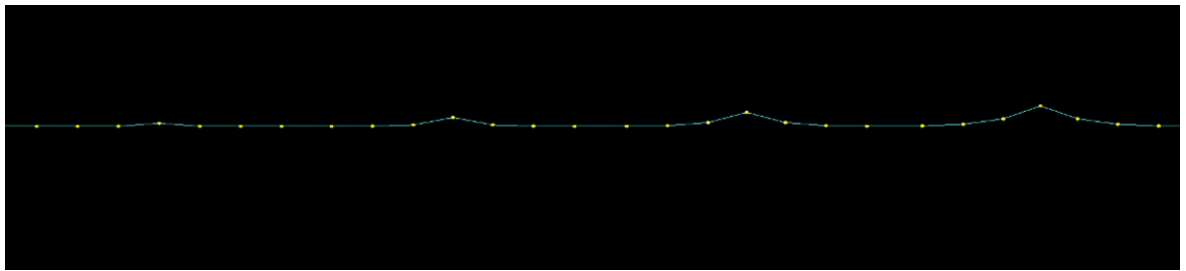


図 4.1.1 圧力パラメータ 0 の場合 (0.2 秒毎)

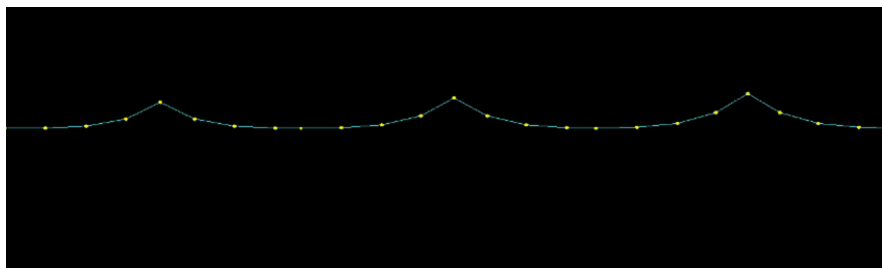
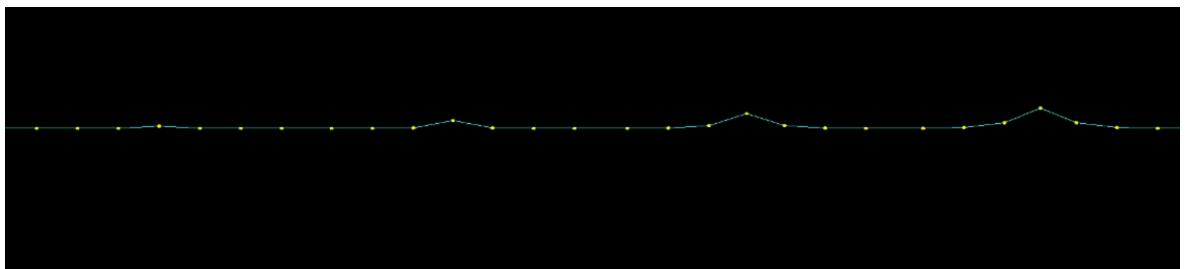


図 4.1.2 圧力パラメータ 0.25 の場合 (0.2 秒毎)

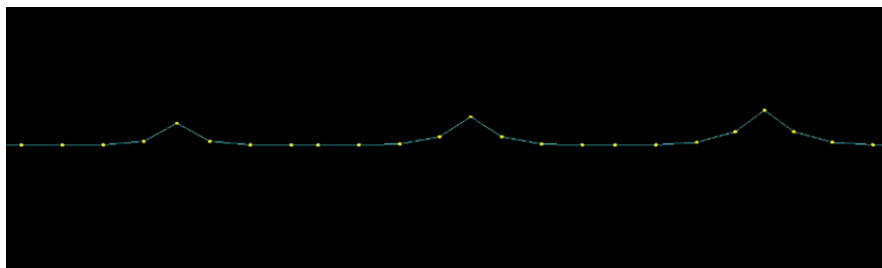
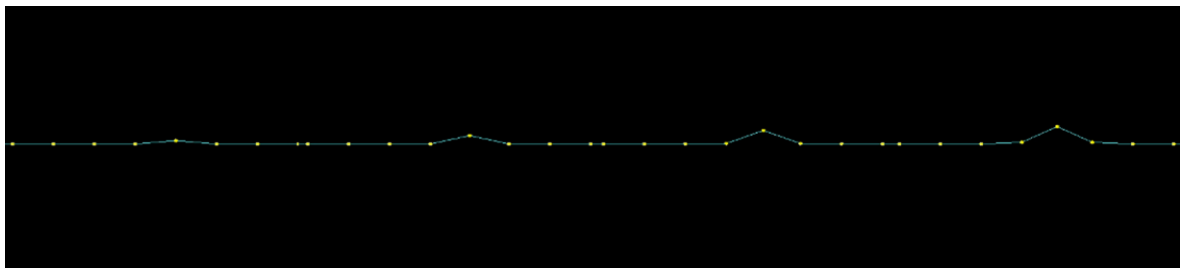


図 4.1.3 圧力パラメータ 0.5 の場合 (0.2 秒毎)

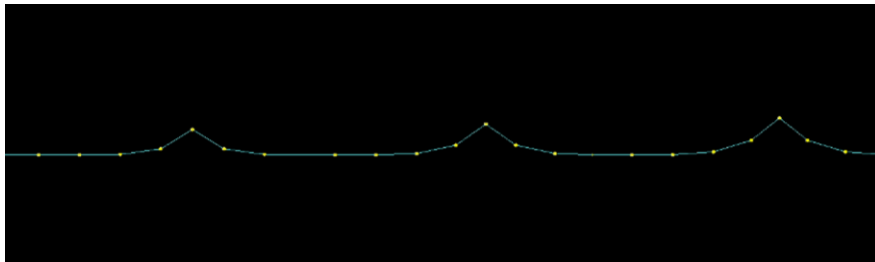
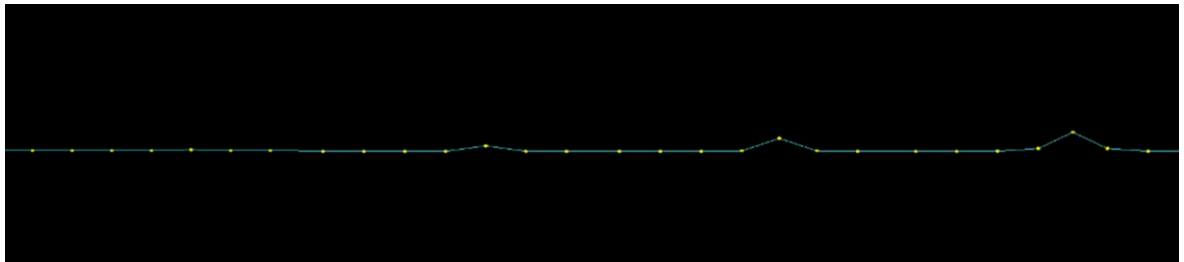


図 4.1.4 圧力パラメータ 0.75 の場合 (0.2 秒毎)

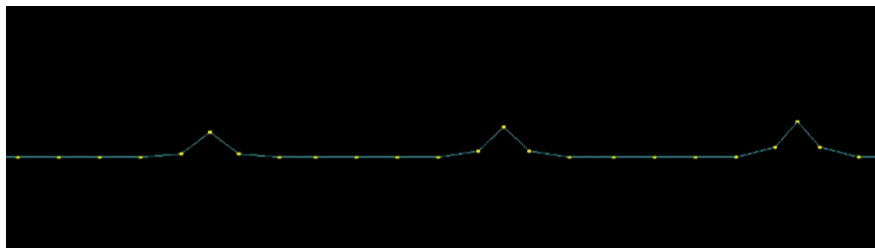
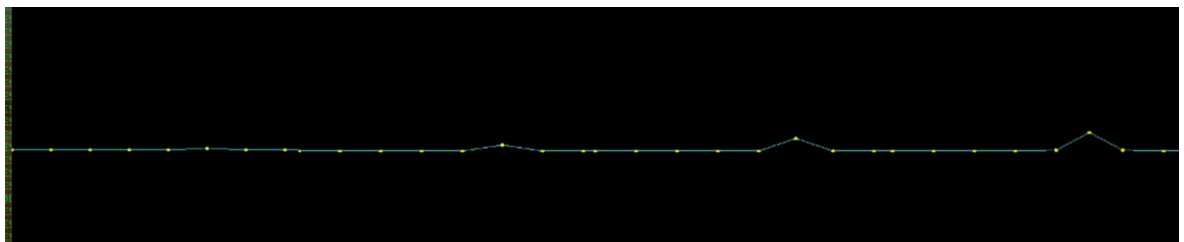


図 4.1.5 圧力パラメータ 1 の場合 (0.2 秒毎)

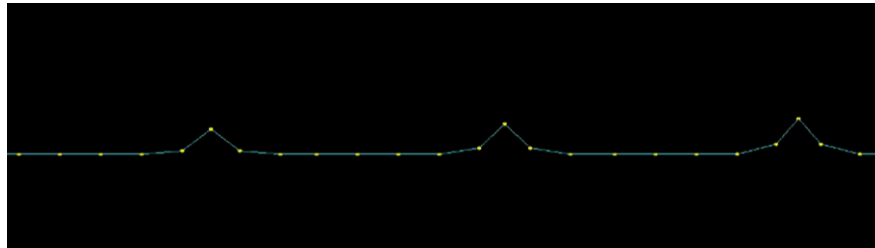
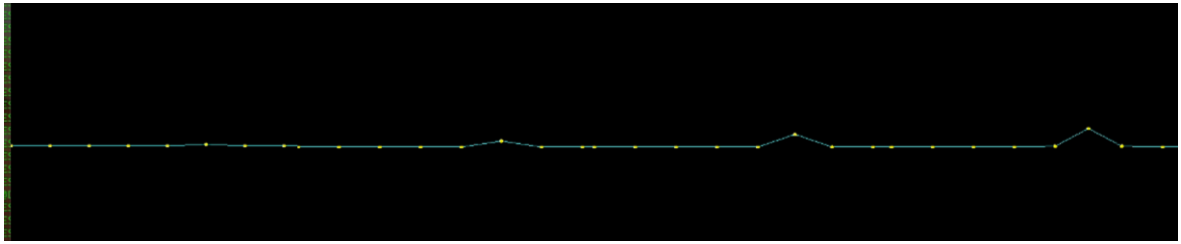


図 4.1.6 摩擦パラメータ 0 の場合 (0.2 秒毎)

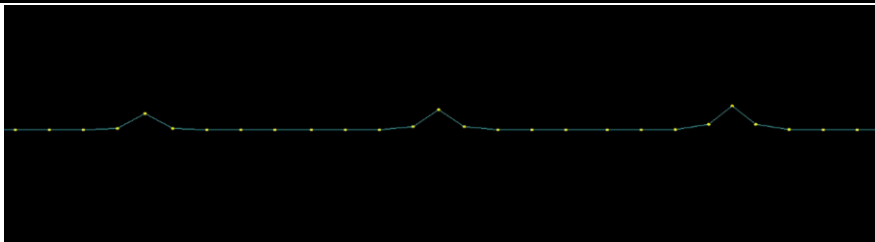
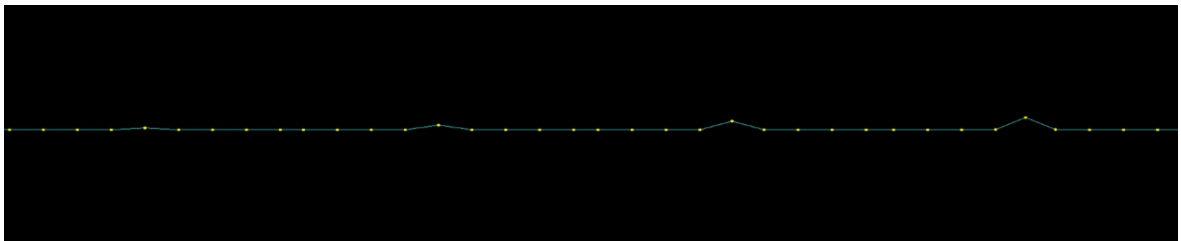


図 4.1.7 摩擦パラメータ 0.25 の場合 (0.2 秒毎)

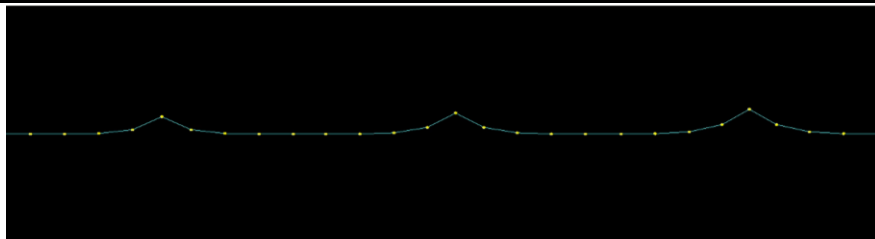
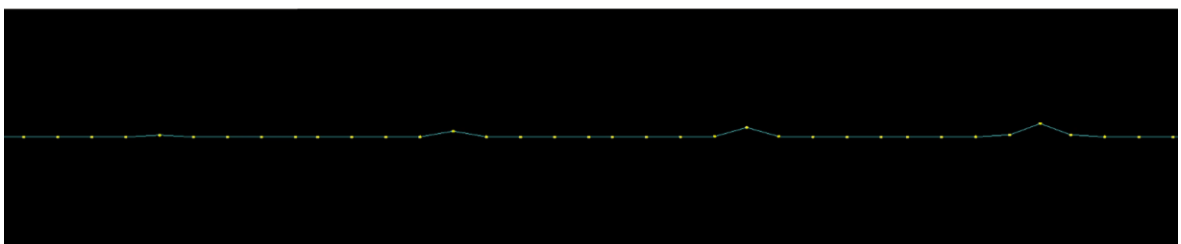


図 4.1.8 摩擦パラメータ 0.5 の場合 (0.2 秒毎)

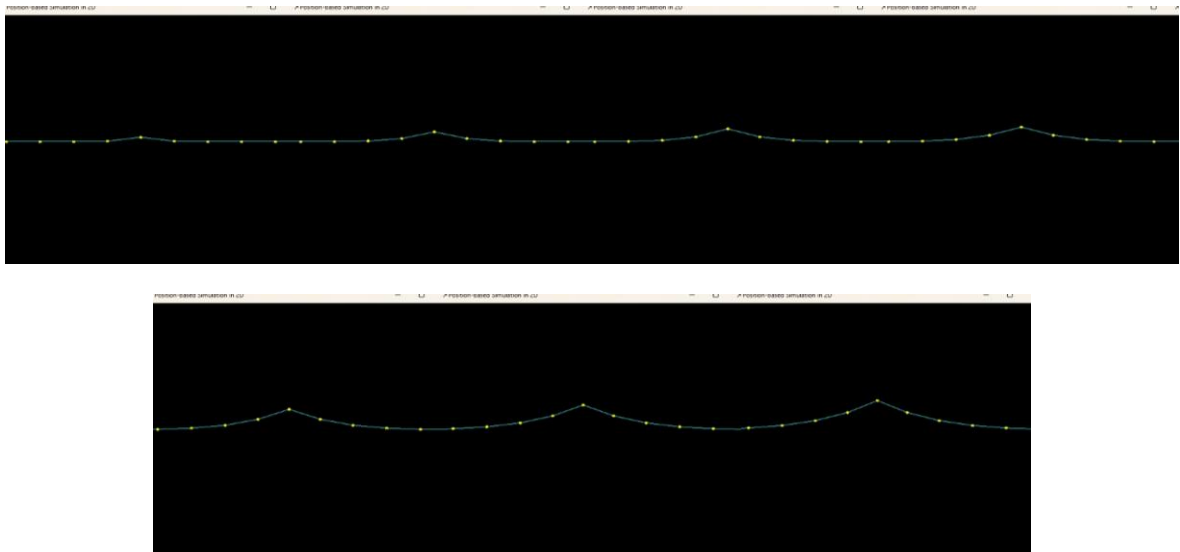


図 4.1.9 摩擦パラメータ 0.75 の場合 (0.2 秒毎)

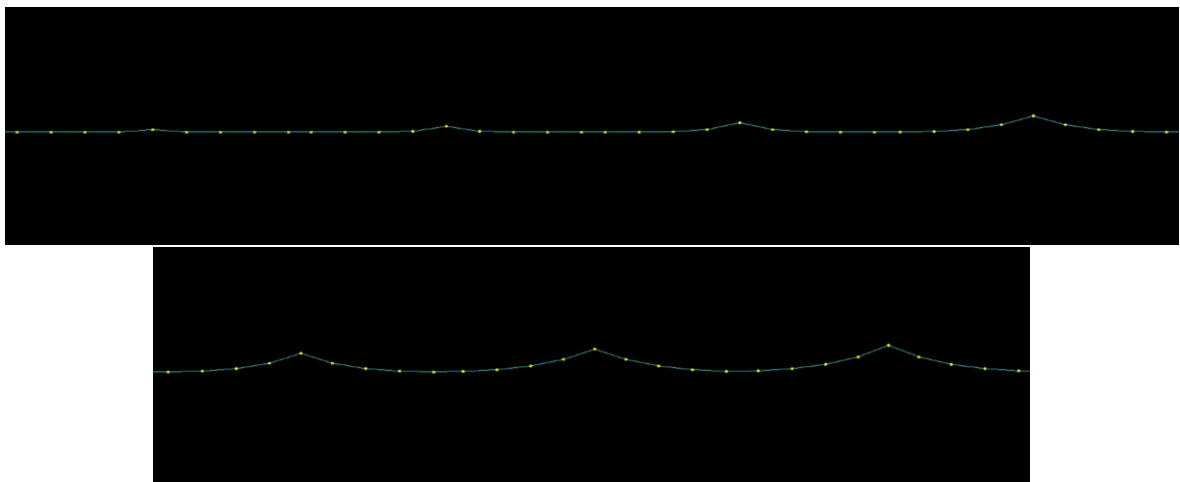


図 4.1.10 摩擦パラメータ 1 の場合 (0.2 秒毎)

次に, 3D シミュレーションを行い検証する. ここでは, 2D のシミュレーションと同様, 圧力パラメータと摩擦パラメータを, それぞれ 0 から 1 まで 0.25 ずつ変化させ, 0.5 秒ごとに撮影した画像を用いて比較する. 圧力パラメータの変化は図 4.1.11, 4.1.12, 4.1.13, 4.1.14, 4.1.15 に示したが, すべてのパラメータにおいて大きな変化は見られなかった. 摩擦パラメータの変化は図 4.1.16, 4.1.17, 4.1.18, 4.1.19, 4.1.20 に示したが, こちらもあまり大きな変化は見られなかった.

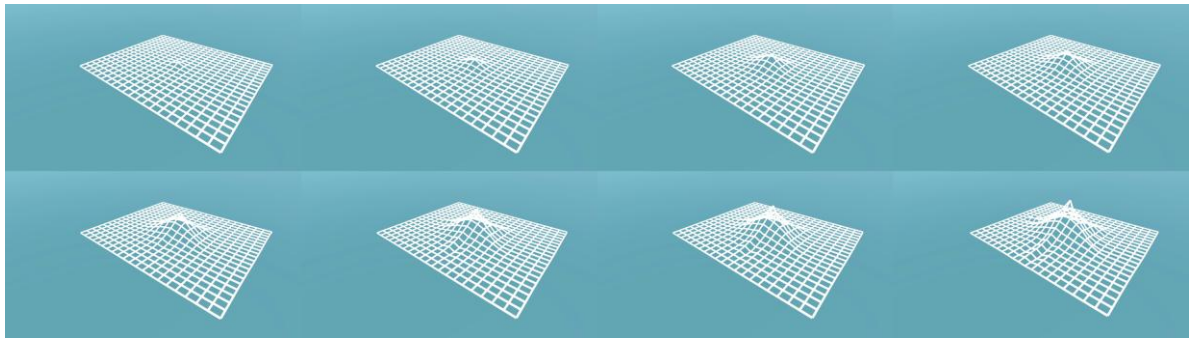


図 4.1.11 圧力パラメータ 0 の場合 (0.5 秒毎)

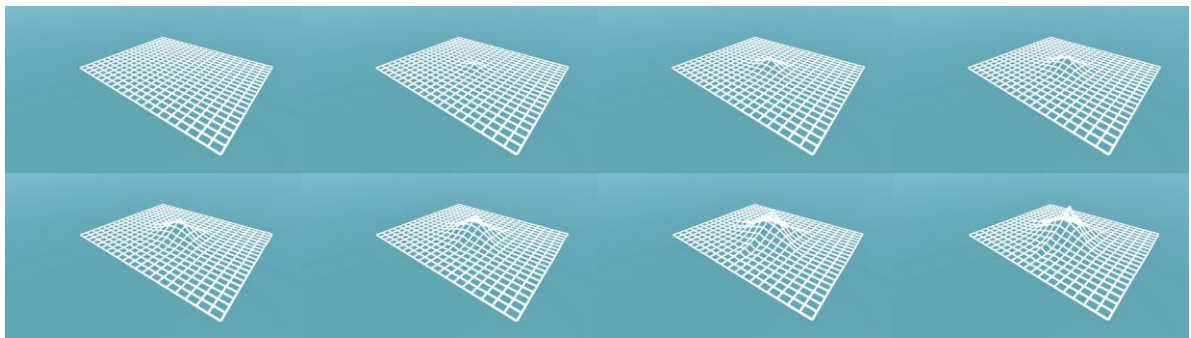


図 4.1.12 圧力パラメータ 0.25 の場合 (0.5 秒毎)

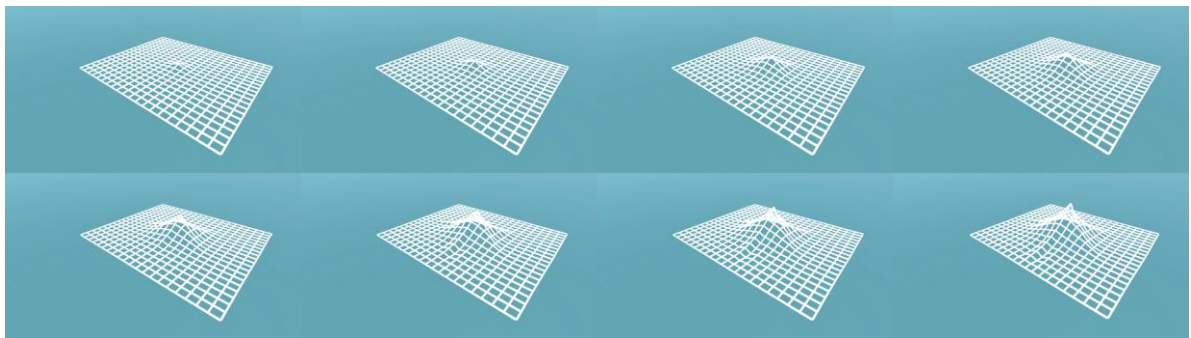


図 4.1.13 圧力パラメータ 0.5 の場合 (0.5 秒毎)

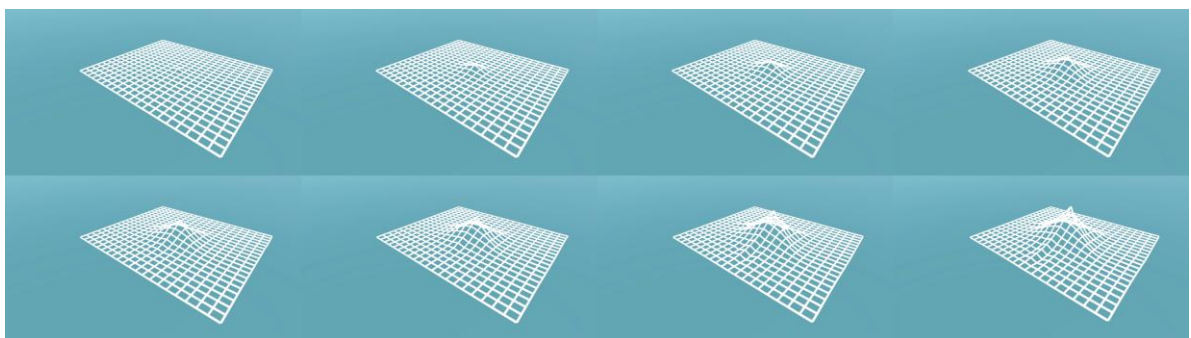


図 4.1.14 圧力パラメータ 0.75 の場合 (0.5 秒毎)

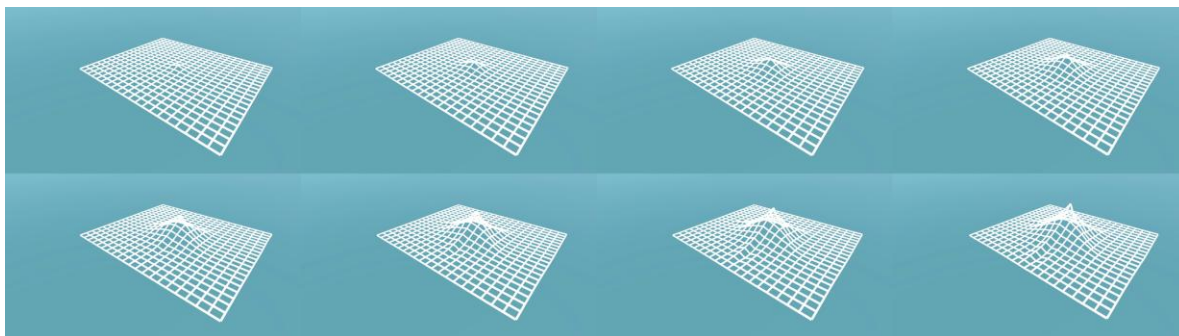


図 4.1.15 圧力パラメータ 1 の場合 (0.5 秒毎)

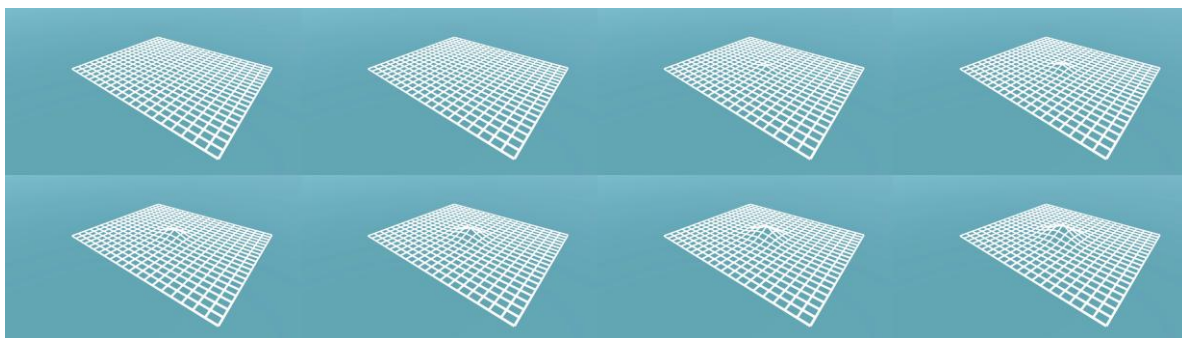


図 4.1.16 摩擦パラメータ 0 の場合 (0.5 秒毎)

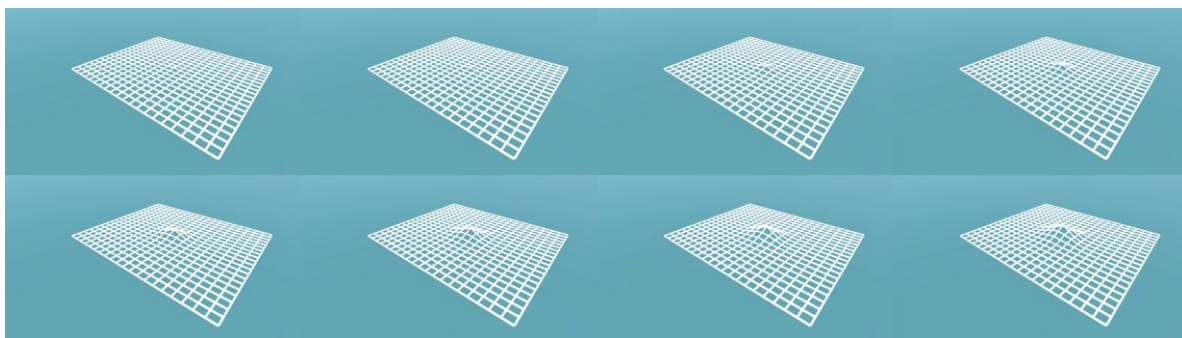


図 4.1.17 摩擦パラメータ 0.25 の場合 (0.5 秒毎)

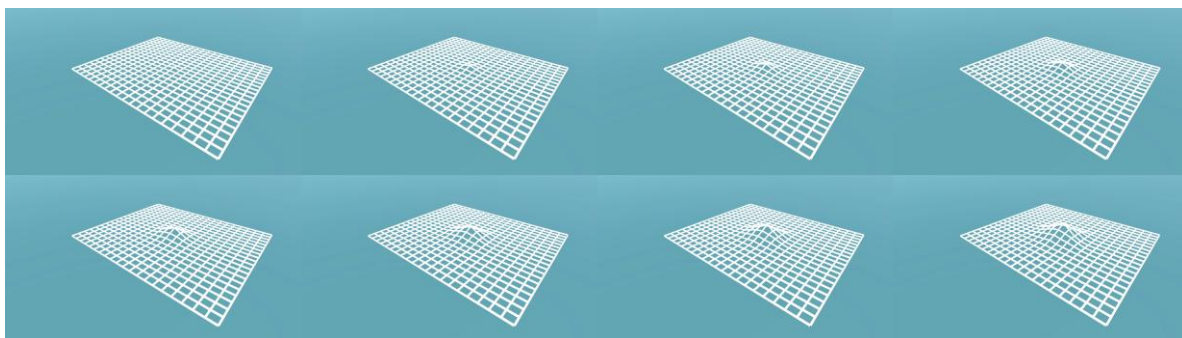


図 4.1.18 摩擦パラメータ 0.5 の場合 (0.5 秒毎)

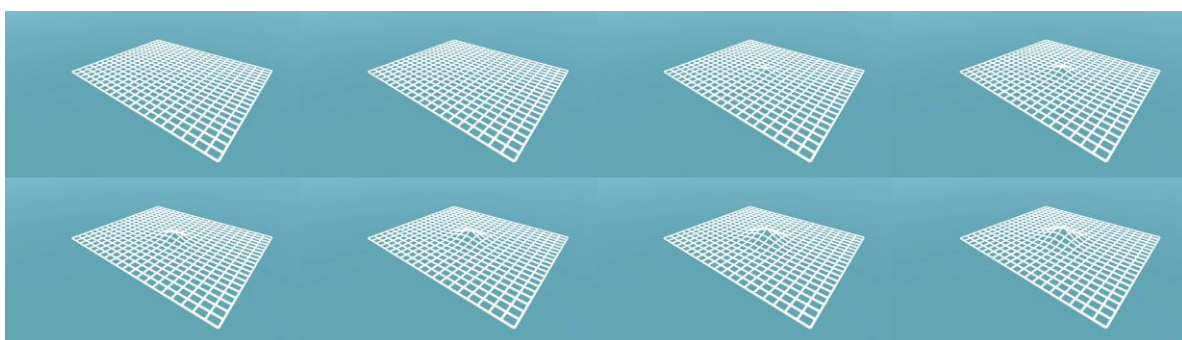


図 4.1.19 摩擦パラメータ 0.75 の場合 (0.5 秒毎)

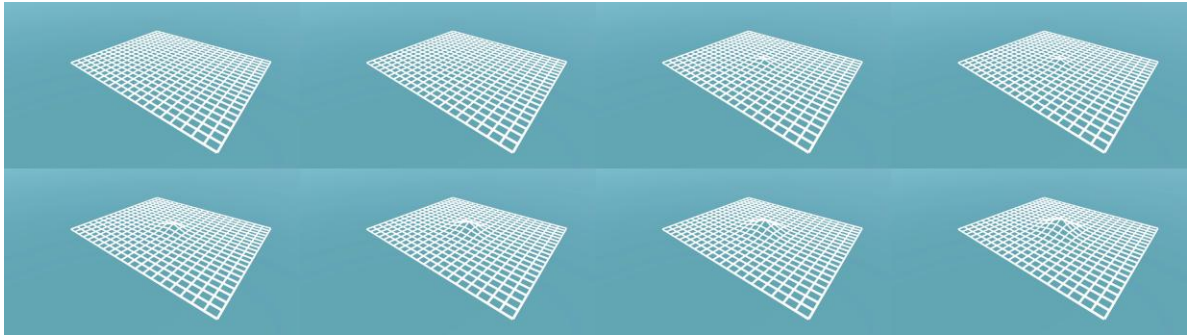


図 4.1.20 摩擦パラメータ 1 の場合 (0.5 秒毎)

4.2. 乾いた布と濡れた布の比較

本節では、乾いた布のシミュレーションと濡れた布のシミュレーションを比較する。前節のようなパラメータを細かく変えた場合の比較はせず、乾いた布の圧力パラメータ、摩擦パラメータはともに 0 とし、濡れた場合の圧力パラメータ、摩擦パラメータはともに 1 とした。前節と同じように、0.5 秒毎の撮影を行った。引っ張り上げた初期は、差がほとんどないが、時間が経過していくにつれて差が大きくなることがわかる。例えば、最も時間が経過した画像である右下に注目して比較すると、図 4.2.1 では張り付く様子も内側に倒れ込む様子もないが、図 4.2.2 では倒れ込む様子が見られる。また、最下段にのみ注目して比較する図 4.2.1, 図 4.2.2 を比較すると、図 4.2.2 の濡れた布がより平面に接触している布の水平方向の動きが抑制され、張り付く様子が確認できる。中でも、図 4.2.2 の最下段中央の画像では、本稿の目的である濡れた布の挙動である張り付きと内側に倒れ込む様子がわかりやすく再現できている。前節ではパラメータの挙動の変化がシミュレーションの挙動の変化に対応していないという結果となったが、どちらもパラメータが 1 となり両方の力が働いている場合のシミュレーションに関しては、濡れた布らしい振る舞いをしている。

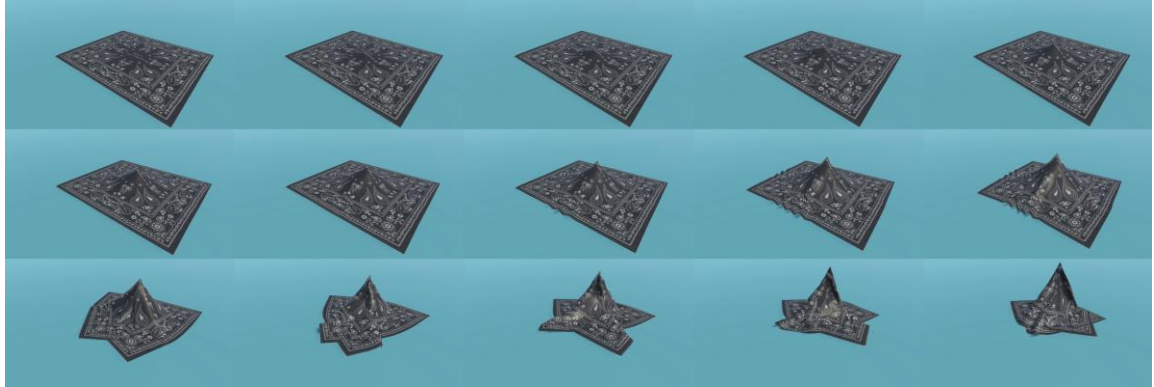


図 4.2.1 乾いた布 (パラメータ 0) の場合 (0.5 秒毎)

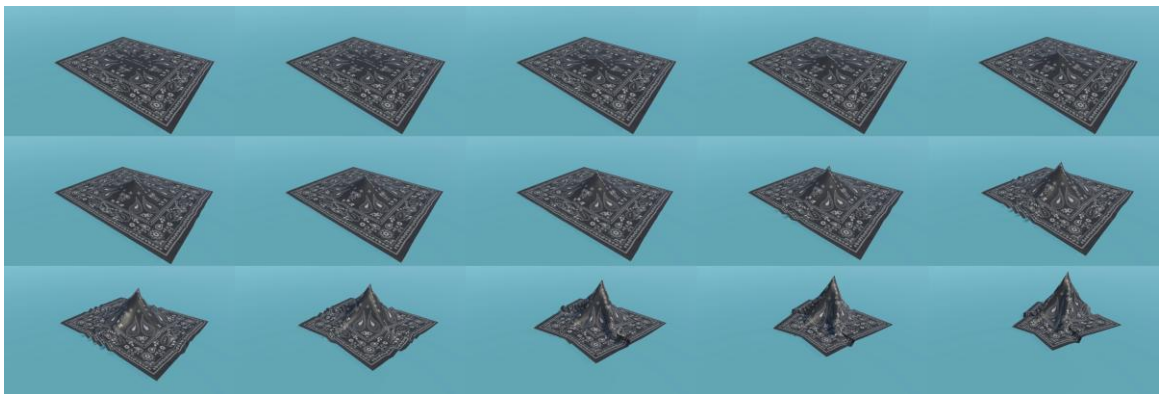


図 4.2.2 濡れた布 (パラメータ 1) の場合 (0.5 秒毎)

4.3. 実物の布とシミュレーションの布の比較

本節では、このシミュレーション手法を用いてどの程度、現実の濡れた布を再現することができたかを比較する。前節で述べたとおり、図 4.2.2 の最下段中央部の画像が最も濡れた布の挙動を再現できているため、この画像を用いて比較する。二つの画像を比較すると、摩擦特性の変化を原因とする濡れた布の張り付きは再現できている。引っ張った部分が内側に倒れ込む様子に関しては、図 4.3.1 のものは倒れ込みが再現されている。しかし、図 4.3.2 で示したように、この布の場合は通気性の変化が小さいと思われるため、この布を再現するシミュレーションとしては過剰に倒れ込みすぎている。また、濡れた布の張り付きは再現できていたものの、張り付いている部分に見ら

れる特徴的なしわが図 4.3.2 には存在するが, シミュレーションによる布である図 4.3.1 では確認できない.

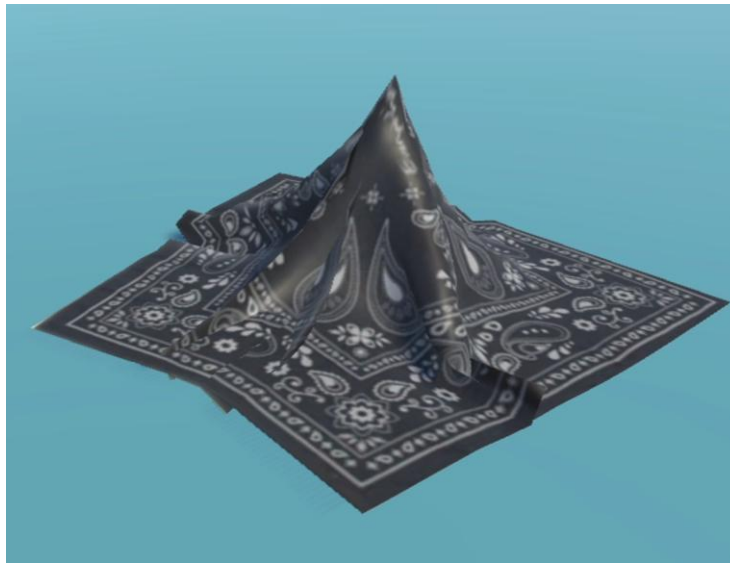


図 4.3.1 濡れた布のシミュレーション結果



図 4.3.2 現実の濡れた布の写真

5. まとめ

本研究では、位置ベース物理法を用いて濡れた布を再現することを目的とした。この目的を達成するために、濡れた布と乾いた布の性質の違いをもとに、その差異を位置ベース物理法で表現する方法を検討し、適していると思われる手法を実装する取り組みを行った。濡れた布と乾いた布の性質の違いである通気性の違いは圧力差による力の差を生み、その力が原因となり引っ張った布が内側に倒れ込む挙動を示し、摩擦力が原因となり、布が接地面に張り付く挙動を示すと考察した。これをシミュレーションするために、圧力差による力位置ベース物理法における速度の変更により表し、摩擦力の変化については、動摩擦力を速度の調節、静止摩擦力を拘束条件として実装した。結果、圧力差による力と摩擦力による力を意味するパラメータを独立して操作した場合は、意図した変化が得られなかったものの、両方の力が働いている状態を再現してシミュレーションを行えば、実際の濡れた布に近い張り付きと引っ張った部分の内側への倒れ込みを再現できた。しかし、濡れた布の特徴的なしわを再現することができていないため、これを再現するために、どのような性質の違いが原因となりしわが生まれるのかを明らかにし、その性質をどのように位置ベース物理法で表現するかが今後の課題となった。

謝辞

本研究を進めるにあたって、論文の見つけ方や読み方、研究の方向性など多くのご指導をいただいた立命館大学情報理工学部教授の仲田晋先生に心より御礼申し上げます。また、立命館大学情報理工学部 画像・音メディアコース コンピュータグラフィックス第 2 研究室の学生の皆様と、毎週のゼミで多くの議論を交わし、さまざまなご助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- [1] M.Müller, B.Heidelberger, M.Hennix, J.Ratcliff: “Position Based Dynamics”, Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol. 18, No. 2, pp. 109-118, 2007.
- [2] 北見 翔, 藤代 一成: “位置ベース力学に基づく折り目シミュレーション”, 映像メディア学会技術報告, Vol. 39, No. 14, pp. 3-9, 2015.
- [3] 金山 知俊: “位置ベース法に基づく仮想書道のための毛筆モデル”, In Proceedings of the Forum on Information Technology 2022, Kanagawa, Japan, pp. 311-312, 2022.
- [4] N.Umetani, R.Schmidt, J.Stam: “Position-based Elastic Rods”, In Proceedings of the Eurographics/ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation, pp. 1-10, 2014.
- [5] 出村 佑史: “流体との相互作用を考慮した毛髪の塑性変形シミュレーション”, 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科修士論文, 2021.
- [6] M.Macklin, M.Müller: “Position based fluids”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 32, No. 4, pp. 1-12, 2013.
- [7] Y.FEI, C.Batty, E.Grinspun, C.Zheng: “A Multi-Scale Model for Simulating Liquid-Fabric Interactions”, ACM Transactions on Graphics, Vol. 37, No. 4, pp. 1-16, 2018.
- [8] 山田 航: “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修士論文, 2012.
- [9] 都竹 初穂: “布の通気性に関する研究(第6報)——湿潤布の通気性——”, 繊維製品消費科学, Vol. 29, No. 8, pp. 340-345, 1988.
- [10] 木下 瑞穂: “湿潤時における布の摩擦特性と布に含まれる水の形態に関する研究”, 広島大学大学院教育学研究科紀要. 第二部, 文化教育開発関連領域, 60 号, pp. 243-247, 2011.