

側鎖結合を考慮した 毛髪の塑性変形シミュレーション

出村 佑史^{1,a)} 藤澤 誠^{1,b)} 三河 正彦^{1,c)}

概要: 本論文では、パーマや寝癖の表現を可能とする毛髪の塑性変形シミュレーション手法を提案する。毛髪のシミュレーションはコンピュータグラフィックスの分野において人間等のキャラクタを表現するのに必要不可欠なものであるが、ほとんどの場合シミュレーションが容易な弾性体としてその挙動が計算され、寝癖や整髪料の影響のような塑性変形は考慮されていない。提案手法では、毛髪の主成分であるケラチンと呼ばれるタンパク質内で結びついている側鎖結合を考慮し、実際の毛髪と同じように各結合で切断及び再結合を繰り返すことによって塑性変形を再現する。これらを、位置ベース法に組み込むことで高速かつ安定したシミュレーションを実現した。

Hair Simulation Based on Internal Chemical Bonds

DEMURA YUJI^{1,a)} FUJISAWA MAKOTO^{1,b)} MIKAWA MASAHIKO^{1,c)}

1. はじめに

毛髪の物理シミュレーションは、CG分野で人間等のキャラクタを表現するのに必要不可欠である。毛髪は基本的に、曲げたり捻ったりすると元の形状に戻ろうとする弾性体としての性質を持つが、寝癖やパーマメントウェーブ(以下パーマ)などのように、元の形に戻らなくなる塑性変形も起こりうる。これらの塑性変形は、毛髪内部に無数に存在する側鎖結合が原因で引き起こされると考えられている[1]。例えば寝癖は、毛髪が濡れた時に側鎖結合の1つである水素結合が切断され、寝ている最中に変形した状態で再結合することによって起きる塑性変形である。毛髪の側鎖結合は毛髪の形状に大きな影響を与えるため、現実的な毛髪をシミュレーションするときには側鎖結合の考慮は不可欠である。しかしながら、毛髪が水などの液体に濡れた時の、表面張力による吸着や質量の変化、水分の伝搬など、

毛髪の挙動の変化はこれまでに正確なモデルが研究されてきた[2], [3], [4]が、CG分野において、毛髪内部に存在する側鎖結合の影響を考慮した研究は我々の調べた限りではない。

本論文では、毛髪内部に側鎖結合が保持する形状とその結合率を与え、外的な影響によって結合率が変動したときに、変化した側鎖結合を形状の計算に取り入れることで、より自然な毛髪の塑性変形を再現する手法を提案する。また提案手法では、毛髪のシミュレーションに、高速で安定したシミュレーションが可能である位置ベース法(Position Based Dynamics) [5]を用い、形状の保持には四元数を用いる手法[8]を導入することで、高速で安定したシミュレーションを可能とする。

2. 関連研究

CGにおいて毛髪は扱う頻度が高く、多くの研究がなされてきたが、毛髪は非常に多くの本数を扱うため(人間の場合は約10万本)、安定性を満たしつつ高速にシミュレーションするのは難しいとされてきた。Müllerらは高速に安定したシミュレーションが可能な位置ベース法を提

¹ 筑波大学
University of Tsukuba
a) s1411464@u.tsukuba.ac.jp
b) fujis@slis.tsukuba.ac.jp
c) mikawa@slis.tsukuba.ac.jp

案し [5], この手法を用いて高速かつ安定な毛髪シミュレーションを提案した [6]. しかしながら, 位置だけでは曲率と振率を保持することができず, 毛髪の曲げ・振れに対する弾性変形を表現することができなかった. 梅谷らは, Müller らの手法を拡張し, ゴーストポイントと呼ばれる目に見えない計算点を追加することで曲率と振率の表現を可能とした [7]. さらに Kugelstadt らは, 梅谷らの手法のゴーストポイントを四元数で代用する手法を提案した [8]. これらにより, 曲げ・ねじれに対する弾性変形を高速に安定してシミュレーションすることが可能となった. 本論文では, この Kugelstadt らの手法 [8] を用いることで毛髪の弾性変形を表現する.

毛髪の性質が一定であればシミュレーションは比較的容易であるが, 実際は水や整髪料などが付着するとその性質は後天的に変化する. Rungjiratananon らは, SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) で再現した水と, Shape Matching 法で再現した毛髪の組み合わせにより, 水の吸収・伝搬や表面張力による吸着など, 両者のインタラクションを実現した [2]. また, Lin らは Rungjiratananon らと同様のモデルを Shape Matching 法ではなく, DER (Discrete Elastic Rods) に適用した [3]. 一方で, これらの研究は毛髪が完全に水没したときの挙動を正確に再現できていない. Fei らは, 毛髪を Discrete Rod, 水を PIC (Particle In Cell) 法, 毛髪に付着する水を Height Field という, スケールの異なる 3 つのモデルで表現する手法を提案し [4], 完全に水没した場合も含めて, 精細に水とのインタラクションをシミュレーションすることを可能とした. しかしながら, これらの研究では毛髪内部の側鎖結合を考慮しておらず, 水からあげて乾かした場合の形状変化などは正確に再現できない.

3. 提案手法全体の流れ

本論文では毛髪を有限個の頂点とそれを結ぶ辺によって表現する. また, 毛髪は基本的には弾性体としての動きをみせるため, 提案手法では, 毛髪の運動を弾性変形を主軸にシミュレーションする. 弾性変形は元の形状に戻ろうとする変形であるため, 変形前の元の形状を保持しておく必要がある. ここで, 覚えておいた元の形状を変化させると, 元とは異なる新しい形状になろうとする. この原理を利用すると, 弾性変形に塑性変形の成分を加えた, 弾塑性変形のシミュレーションが可能となる.

毛髪には寝癖やパーマなど塑性変形が見られるが, その主な原因として, 毛髪内部に存在する側鎖結合が挙げられる [1]. 提案手法では, 毛髪の各頂点 (計算点) に分布する各種側鎖結合と, その結合率の変動を元に, 弾性変形における元の形状を変化させることで, 側鎖結合を考慮した塑性変形を再現する.

上述した原理を位置ベース法 [5] に組み込むことでシミュ

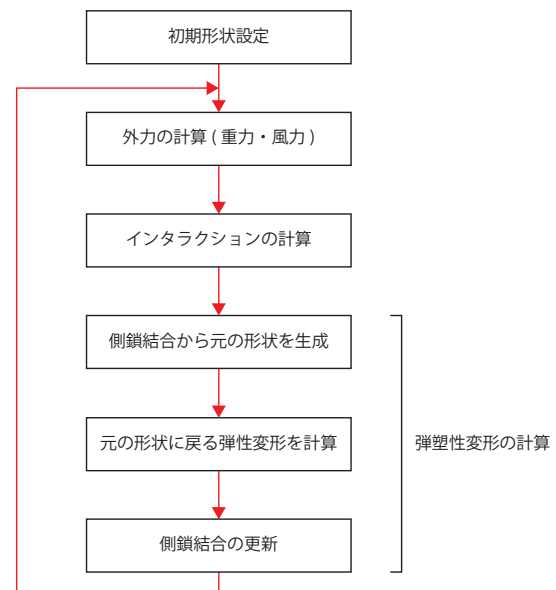


図 1 全体の流れ

レーションを行う. 提案手法全体の流れを図 1 に示す. 図 1 中の各処理について, 以下で説明する.

初期形状設定

初期処理として毛髪に初期形状を与える.

外力の計算

毛髪に重力や風力などの外力による影響を付与する. また, 時間経過や風, パーマ剤などの外的な影響による各側鎖結合の結合率の変動はここで処理する.

インタラクションの計算

他の毛髪や人間の頭部, 床などの, 他の物体とのインタラクションを計算する.

側鎖結合から元の形状を生成

毛髪内に存在する各側鎖結合が保持している形状から, 全体として毛髪が維持しようとする形状を求める. (5.2 節)

元の形状に戻る弾性変形を計算

前の処理で生成した形状を毛髪元の形状とみなし, その形状に戻るように制約を与えることで弾性変形をシミュレーションする. (4.1 節)

側鎖結合の更新

各側鎖結合の結合率の変動量に応じて, 現在の毛髪の形状, 今までの各側鎖結合が保持していた形状を元に, 各側鎖結合が保持する形状を更新する. (5.3 節)

4. 毛髪の弾性変形シミュレーション

4.1 位置ベース法の制約

毛髪の弾性変形シミュレーションは, 四元数を用いた Kugelstadt らの手法 [8] を用いる. この手法では, ある計算点 p_1 と, それと隣り合う計算点 p_2 の間の辺に, その辺の姿勢情報として四元数 q を格納する. このとき, 毛髪の変形である, 伸び・剪断と曲げ・ねじれについてのそれぞ

れの制約を以下で説明する.

4.1.1 伸び・剪断

毛髪の伸び・剪断に関する制約条件 C_s を式 (1) に示す.

$$C_s(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, q) = \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{l} - \mathbf{R}(q)\mathbf{e} = \mathbf{0} \quad (1)$$

ここで, $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ は隣り合う計算点, q はその間の辺の姿勢を表す四元数, l は辺の元の長さを意味する. また, \mathbf{e} は基底とするベクトルであり, $\mathbf{R}(q)\mathbf{e}$ は, 基底ベクトルを四元数 q で回転させること, すなわち姿勢 q の実際の向きを意味している.

伸び・剪断の制約条件から求まる位置の修正式を式 (2)-(5) に示す.

$$\Delta \mathbf{p}_1 = + \frac{w_{\mathbf{p}_1} l}{w_{\mathbf{p}_1} + w_{\mathbf{p}_2} + 4w_q l^2} \gamma \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{p}_2 = - \frac{w_{\mathbf{p}_2} l}{w_{\mathbf{p}_1} + w_{\mathbf{p}_2} + 4w_q l^2} \gamma \quad (3)$$

$$\Delta q = + \frac{w_q l^2}{w_{\mathbf{p}_1} + w_{\mathbf{p}_2} + 4w_q l^2} \gamma q \bar{e} \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1}{l} - \mathbf{R}(q)\mathbf{e} \quad (5)$$

$w_{\mathbf{p}_1}, w_{\mathbf{p}_2}, w_q$ はそれぞれ $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, q$ の重みであり, \mathbf{e} は四元数 $(0, \mathbf{e})$ を, γ は四元数 $(0, \gamma)$ を意味する. また, \bar{e} は \mathbf{e} の共役四元数である.

4.1.2 曲げ・ねじれ

毛髪の曲げ・ねじれに関する制約条件 C_b を式 (6), (7) に示す.

$$C_b(q_1, q_2) = \Omega - s\Omega_o = \mathbf{0} \quad (6)$$

$$s = \begin{cases} +1 & \text{if } |\Omega - \Omega_o|^2 < |\Omega + \Omega_o|^2 \\ -1 & \text{if } |\Omega - \Omega_o|^2 > |\Omega + \Omega_o|^2 \end{cases} \quad (7)$$

ここで, q_1, q_2 はそれぞれ, 隣り合った辺の保持する姿勢情報であり, Ω はその 2 辺が構成する形状 (どれだけ曲がり, ねじれているか) を意味する. また, Ω は現在の形状, Ω_o は元の形状である. 式 (8) に Ω の計算方法を示す.

$$\Omega \approx \Im(\bar{q}_1 q_2) \quad (8)$$

ここで, $\Im(q)$ は四元数 q のベクトル成分を意味する.

曲げ・ねじれの制約条件から求まる位置の修正式を式 (9)-(11) に示す.

$$\Delta q_1 = + \frac{k' w_{q_1}}{w_{q_1} + w_{q_2}} q_2 (\Omega - s\Omega_o) \quad (9)$$

$$\Delta q_2 = - \frac{k' w_{q_2}}{w_{q_1} + w_{q_2}} q_1 (\Omega - s\Omega_o) \quad (10)$$

$$s = \begin{cases} +1 & \text{if } |\Omega - \Omega_o|^2 < |\Omega + \Omega_o|^2 \\ -1 & \text{if } |\Omega - \Omega_o|^2 > |\Omega + \Omega_o|^2 \end{cases} \quad (11)$$

ここで, Ω は四元数 $(0, \Omega)$ を意味し, w_{q_1}, w_{q_2} はそれぞれの辺に対する重みであり, 曲がりにくさ, ねじれにくさを表す. また, k' は毛髪の弾性を表す係数である. この値を

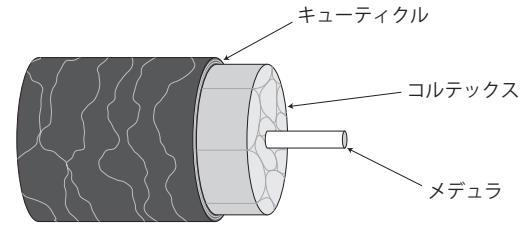


図 2 毛髪を構成する層

1 に近づけるとより硬い毛髪となり, 0 に近づけるとより柔らかい毛髪になる. しかしながら, 解が収束するまで反復試行を行う位置ベース法において, k' が及ぼす影響は非線形となる. そこで, 誤差を最小限にするために, 計算で用いる k' を式 (12) で更新する [5].

$$k' = 1 - (1 - k)^{\frac{1}{n}} \quad (12)$$

ここで, n はこれまでに反復した回数, k は毛髪の弾性係数である. k は毛髪の構造により, 毛髪全体で同じ値とはならない. 次節で k の計算について述べる.

4.2 キューティクル剥離

図 2 に示すように, 毛髪は大きく分けてキューティクル, コルテックス, メデュラの三層構造となっている [9] が, キューティクルを剥離した毛髪とそうでない毛髪の曲げ応力の測定実験から, キューティクルが毛髪全体の弾性力の 6 割近くを生み出していることがわかっている [10]. しかしながら, キューティクルは最も外側に存在し日常的にダメージを受けるため, 提案手法ではキューティクルが受けたダメージによる弾性係数 k の変動を考慮する.

毛髪が日常生活において均等にダメージを受けたと考えると, k は式 (13), (14) で求められる (ただし作られたばかりの柔らかい毛根部は無視する).

$$k = k_o - k_{\text{cut}}(1 - c) \quad (13)$$

$$c = \begin{cases} 1 - sd & \text{if } sd < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

ここで, k_o はキューティクルが剥がれていない健康な状態の弾性係数を意味し, k_{cut} は同状態におけるキューティクルのみの弾性係数を意味する. 提案手法では文献 [10] の実験結果より $k_{\text{cut}} = 0.5764k_o$ とした. なお, d は毛根からの距離, s は剥離する速度を表すパラメータである.

5. 側鎖結合を考慮した塑性変形

5.1 側鎖結合とは

毛髪はその 90% 以上がケラチンと呼ばれるタンパク質であり, ケラチンはアミノ酸が集まってできた無数のポリペプチドを主鎖結合として構成されている [9]. 一方で, ポリペプチド同士を複数種の側鎖結合が横方向に繋いでいて, 側鎖結合によって毛髪はより強固となり, 曲げ・ねじれに

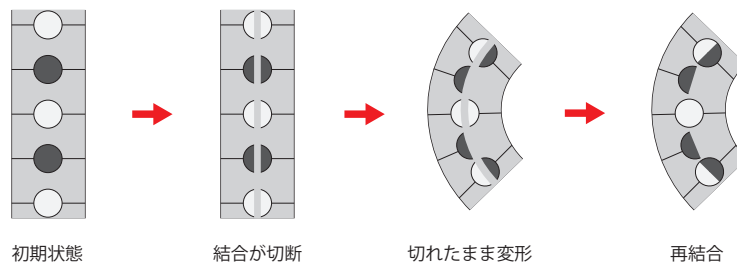


図 3 塑性変形が発生する工程

対する弾性変形を起こしている [1]。図 3 に示すように毛髪はこの側鎖結合が切断，再結合を起こすことによって塑性変形を起こすため，寝癖やパーマ等の塑性変形をより正確にシミュレーションするにはこの側鎖結合の考慮が必要となってくる。以下に主要な側鎖結合を示す。

水素結合

最も弱い結合で，水によって簡単に切断され，乾くと再結合する。寝癖の原因とされる。

イオン (塩) 結合

電氣的に結びついた結合であり，シャンプーや整髪料等により pH が変化すると，切断される。

ジスルフィド (シスチン) 結合

硫黄を含むタンパク質に見られる強い結合。パーマはこの結合を人為的に操作することで髪型を長い期間変化させている。

ペプチド結合

ポリペプチド主鎖を構成している結合と同じもの。提案手法ではこの結合は切れないものとして扱う。

5.2 側鎖結合の影響の適用

実際の結合は種類ごとに毛髪内に無数に存在するため，個々の結合についてコンピュータでシミュレーションすることは計算時間とメモリ量の点から難しい。そのため提案手法では結合の種類別に，全結合時における影響力 f と結合率 $b \in [0, 1]$ をパラメータとして与え，結合率と応力が比例すると考えて線形補間することによって影響力を計算する。この考え方を式にすると以下の式 (15) が得られる。

$$\Omega_o = \frac{\sum_{j \in B} f_j \{ \Omega_j + (1 - b_j)(\Omega - \Omega_j) \}}{\sum_{j \in B} f_j} \quad (15)$$

ここで， Ω_o は 4.1 節の弾性変形の計算で用いる元の形状， Ω_j, f_j, b_j はそれぞれ j 種めの側鎖結合の形状，影響力，結合率であり， Ω は現在の形状， B は考慮する側鎖結合の集合をそれぞれ意味している。

この式を曲げ・ねじれの修正式に適用するが，この計算には各種結合の形状が必要がある。提案手法では，5.1 節で述べた 4 種の結合それぞれの形状を保持することで実現する。なおこの情報は，すべての頂点に，その点における各結合の結合率とともに格納する。

5.3 側鎖結合の更新

側鎖結合は，その一部が切断したり再結合したりする。切断されたときは切れた結合が自由になり応力が低下するだけであるが，再結合すると新たな形状を記憶する。ある結合の種類 j において新たな形状の成分を分解すると，そもそも切断されていなかった結合が保持する形状と，今まで切断されていたが再結合によって記憶した現在の形状の 2 つに分けられる。前者の成分量は以前の j の結合率，後者の成分量は j の結合率の増加分と考えることで新たな形状を計算することができる。式 (16) に形状の更新に用いる式を示す。

$$\Omega_j \leftarrow \begin{cases} \frac{b_j \Omega_j + \Delta b_j \Omega}{b_j + \Delta b_j} & \text{if } \Delta b_j > 0 \\ \Omega_j & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

b_j は結合 j の増減前の結合率であり， Δb_j はその増減量である。なお， b_j は風・時間経過による乾燥やパーマなど，外的な影響が加わったときにその影響力に応じて変化させる。具体的な変化のさせ方はシミュレーションを行うシーンにより異なるため，7 章の各シーンの説明で述べる。

6. 外力とインタラクション

毛髪に加わる外力として，重力と風を考える。位置ベース法では“力”は考えないため，代わりに位置から計算された速度に外力の影響を加える。重力は重力加速度を g ，シミュレーションタイムステップを Δt とすると，毎ステップ速度に $g\Delta t$ 加算することで表現する。また，風の影響については， $\mathbf{p}_{\text{blower}}$ から $\mathbf{p}_{\text{target}}$ に向かって吹きつける風 $\mathbf{w} = \mathbf{p}_{\text{target}} - \mathbf{p}_{\text{blower}}$ を仮定し，計算点との位置関係および毛髪の辺の向きに基づいて，各計算点の速度変化を求め，速度に加算する。式 (17) に風の影響を求める計算式を示す。

$$\Delta \mathbf{v}_w = \alpha \frac{\sin \theta}{d+1} \hat{\mathbf{w}} \Delta t \quad (17)$$

ここで， $\Delta \mathbf{v}_w$ は頂点 \mathbf{p} にかかる風の力であり， α は風の強さを表す係数， θ は毛髪を構成する辺と風の流れ \mathbf{w} のなす角， $\hat{\mathbf{w}}$ は \mathbf{w} の単位ベクトル， d は \mathbf{p} から \mathbf{w} への距離を表す。

毛髪どうしのインタラクションにはペナルティ法を用いる。ここでは，毛髪を構成する辺間の距離が近くなりすぎ

表 1 各シーンのパラメータ設定

	シーン 1	シーン 2	シーン 3
タイムステップ幅 [s]	1/360	1/360	1/360
重力加速度 [m/s ²]	9.80	9.80	9.80
反復回数	5	5	5
毛髪の長さ [cm]	24	24	48
弾性係数 k_o	0.05	0.05	0.05
水素結合の影響 [%]	33	33	合計 63
イオン結合の影響 [%]			
ジスルフィド結合の影響 [%]	合計 67	合計 67	20
ペプチド結合の影響 [%]			17
キューティクル剥離 [%/cm]	0.33	0.33	0.33
計算する毛髪の本数	200	200	100
毛髪上の計算点密度 [個/cm]	0.33	0.33	0.33

たときに、式 (18) で求めたペナルティ力を、外力と同様に速度に追加する。

$$\Delta v_p = \sum_{j \in C} \begin{cases} \alpha \frac{2r - |\mathbf{p} - \mathbf{p}_j|}{2r} \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_j)}{|\mathbf{p} - \mathbf{p}_j|} \Delta t & \text{if } |\mathbf{p} - \mathbf{p}_j| < 2r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

ここで、 Δv_p は頂点 \mathbf{p} におけるペナルティ力であり、 C は \mathbf{p} を始点とする辺と他の毛髪の辺の組み合わせの集合、 α はペナルティ力の強さを制御する係数、 r は毛髪の半径、 \mathbf{p}_j は \mathbf{p} から辺 j に対して垂線を引いた時の交点座標である。

7. 結果と考察

7.1 実験設定と結果

提案手法の有効性を確かめるため、3つのシーンを作成し実験を行なった。実行環境として CPU に Intel Core i5-2400 3.10GHz を搭載した PC を用いた。全てのシーンで 30 ~ 60fps で安定して動作した。毛髪のレンダリングには Kajiya-Kay モデル [11] を用い、さらに、毛髪間を補間することで本数を増やし、頂点間をベジェ補間することで毛髪を滑らかにしている。各シーンに用いたパラメータの設定を表 1 に示す。

シーン 1 シーン 1 の結果を図 4 に示す。主に水素結合が原因で引き起こされる寝癖を再現するために、このシーンでは、水分により水素結合がほとんど切れた状態 (毛髪全体で $b_{\text{hyd}} = 0$ とした) から、床に毛髪を押しつけた後、毛髪全体の結合率 b_{hyd} の値を人為的に大きくした。なお、水素結合以外の側鎖結合ははじめから全て結合していて、このシーン内で結合率が変化することはないものとした。

シーン 2 シーン 2 の結果を図 5 に示す。ドライヤーによるスタイリングを再現するために、シーン 1 と同様に水分によって水素結合がほとんど切れた状態の毛髪を床に押しつけた後、ドライヤーの温風を模した風を当てた。なお、水素結合以外の結合ははじめから全て結合していて、このシーン内で結合率が変化することはない。以下の式 (19) に水素結合の結合率 b_{hyd} を変化

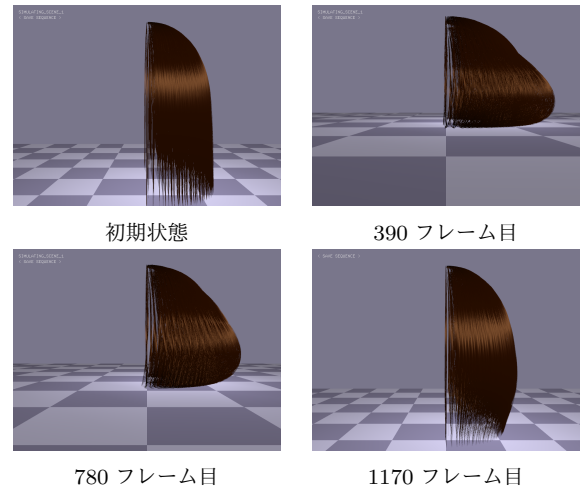


図 4 シーン 1

させるための式を示す。

$$\Delta b_{\text{hyd}} = \begin{cases} 0.003|\Delta \mathbf{v}_w| & \text{if } b_{\text{hyd}} < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (19)$$

ここで、 $\Delta \mathbf{v}_w$ は式 (17) で求めた風力である。図 5 の下段は、シーン 2 の水素結合率を可視化したものであり、青色が結合率が低く、赤色に近づくほど高いことを意味している。

シーン 3 シーン 3 の結果を図 6 に示す。ジスルフィド結合、イオン結合、水素結合の 3 種を人為的に切断・再結合するパーマをシミュレーションするために、完全に乾いた状態の毛髪 (毛髪全体の全ての側鎖結合の結合率を 100% とした) を、パーマに用いるロッドを模した円柱形の物体に巻きつけ、その形状で各種結合を一度切断した後、全てを再結合させた。ただし、実際のパーマでは強いパーマ剤を使用してもジスルフィド結合は 20% 程度しか切断されないため、それを考慮して 80% のジスルフィド結合を残しておくものとし、パーマ剤でも切断されることがないペプチド結合に関してのみ終始結合されている状態であるものとする。

7.2 考察

シーン 1 の結果から、床によって曲げられた形に癖が残っていることが確認できる。水素結合が再結合したときに、変形させられている形状を記憶したために発生した塑性変形である。これは、寝癖の典型的な発生原因であり、寝癖の基本的なメカニズムを再現できているといえる。一方で、実際の寝癖では再結合のペースにばらつきがある。また、毛髪の水分含有量による部分的な質量変化も考慮していないため、全体的に形状がそろった結果となった。

シーン 2 の結果から、風を当てる前と比べてカールしていることが確認できた。風の影響を強く受けていた部分では強く、風の影響が弱かった部分では弱くカールしている。主な原因は、風が毛髪に与えた物理的な影響によって、風

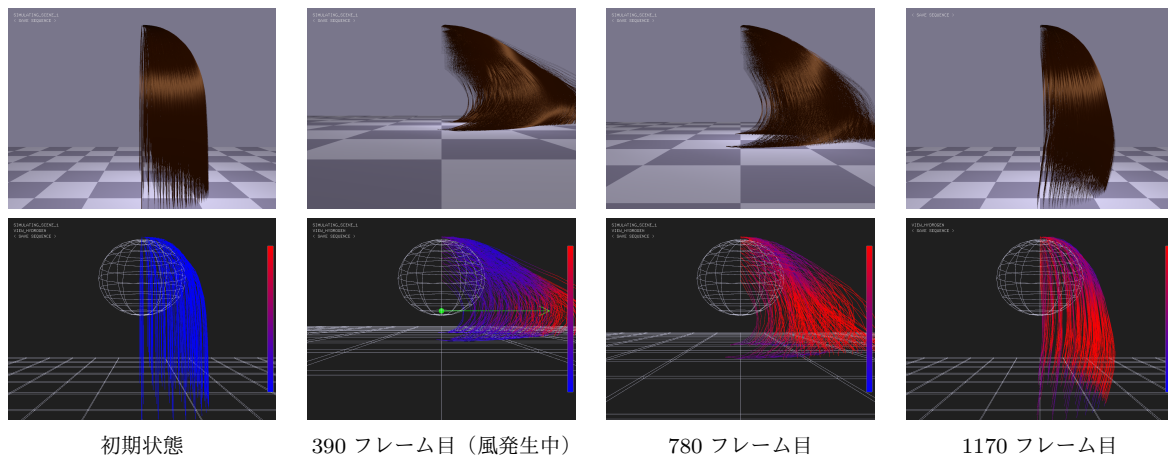


図 5 シーン 2

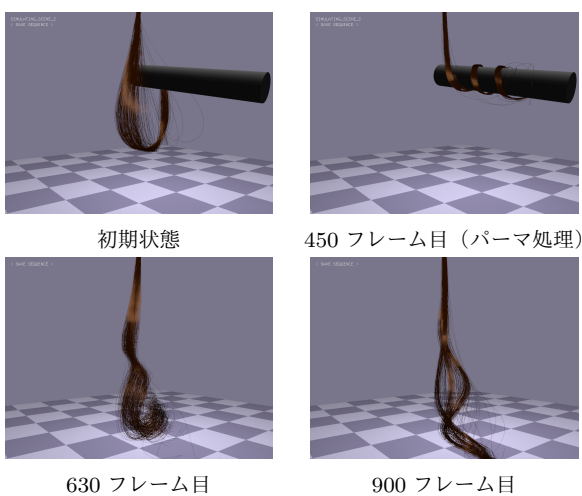


図 6 シーン 3

の流れの中心に近い部分ほど大きく変形したからであると
 考えられる。

シーン 3 の結果から、パーマ処理を施すことによって
 シーン終了時の形状に明らかな差が見られた。パーマ処理
 を施した毛髪には、パーマに見られる典型的なカールが確
 認でき、パーマの基本的なメカニズムを再現できていると
 いえる。しかし、水分量による水素結合への影響や温度に
 ついて考慮していない提案手法では、完全なパーマの再現
 はできていない。

8. 結論

本論文では、毛髪の側鎖結合が切断および再結合を起こ
 すことによって発生する塑性変形をシミュレーションする
 モデルを提案した。そして実験により、主に側鎖結合が原
 因で起こっているとされている寝癖、ドライヤーによるス
 タイリング、パーマの基本メカニズムを再現できているこ
 とを確認した。なお、このモデルはシンプルなベクトルと
 四元数の演算のみで実現しており、提案手法を導入するこ
 とによる計算負荷の増加はほとんど見られなかった。

一方で、毛髪の構造は厳密に考えると非常に複雑であり、

本論文では特に外力、インタラクション、結合率の変化条
 件、水分の質量が正確なモデルに基づいておらず、現象を
 厳密にシミュレーションできているとはいえない。熱や水
 分含有量の変化によるより厳密な側鎖結合のふるまいを軽
 量なモデルで再現することが今後の課題として挙げられる。

参考文献

- [1] DEMI: 髪と頭皮の基礎理論 (online), 入手先
 (http://www.demi.nicca.co.jp/salonsupport/beauty.html),
 (2018.1.11).
- [2] Rungjiratananon, W., Kanamori, Y. and Nishita, T.:
 Wetting Effects in Hair Simulation, *Computer Graph-
 ics Forum*, Vol. 31, pp. 1993-2002, (2012).
- [3] Lin, W. C., Liao, W. K. and Lee, C. H.: Animating Wet
 Hair Interacting with Particle-Based Fluid, In *Proce-
 edings of SA '13 SIGGRAPH Asia 2013 Posters*, pp. 34:
 1-1, (2013).
- [4] Fei, Y., Maia, H., Batty, C., Zheng, C. and Grinspun,
 E.: A Multi-Scale Model for Simulating Liquid-Hair In-
 teractions, *ACM Transactions on Graphics(TOG)*, Vol.
 36, No. 4, pp. 56: 1-17, (2017).
- [5] Müller, M., Heidelberger, B., Hennix, M. and Ratcliff, J.:
 Position Based Dynamics, In *Proceedings of VRIPHYS
 2006*, pp. 71-80, (2006).
- [6] Müller, M., Kim, T. Y. and Chentanez, N.: Fast Sim-
 ulation of Inextensible Hair and Fur, In *Proceedings of
 VRIPHYS 2012*, pp. 39-44, (2012).
- [7] Umetani, N., Schmidt, R. and Stam, J.: Position-
 Based Elastic Rod, In *Proceedings of ACM SIG-
 GRAPH/Eurographics Symposium on Computer Ani-
 mation*, pp. 1-10, (2014).
- [8] Kugelstadt, T. and Schomer, E.: Position and Orienta-
 tion Based Cosserat Rods, In *Proceedings of ACM SIG-
 GRAPH/Eurographics Symposium on Computer Ani-
 mation*, pp. 169-178, (2016).
- [9] Yang, F. C., Zhang, Y. and Rheinstädter, M. C.: The
 Structure of People's Hair, *PeerJ* 2:e619, (2014).
- [10] 曾我部敦, 安田正明, 野田章: 毛髪物性に関する研究 1, 日
 本化粧品技術者会誌, 36 巻, 3 号, pp. 207-216, (2002).
- [11] Kajiya, J. T. and Kay, T. L.: Rendering Fur with Three
 Dimensional Textures, In *Proceedings of the 16th An-
 nual Conference on Computer Graphics and Interactive
 Techniques*, pp. 271-280, (1989).