

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[†] 藤澤 誠[†](正会員) 三河 正彦[†][†]筑波大学

Hair Simulation Based on Internal Chemical Bonds

Yuji DEMURA[†], Makoto FUJISAWA[†](Member), Masahiko MIKAWA[†][†]University of Tsukuba

〈あらまし〉 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 (Position Based Dynamics) 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。

キーワード：毛髪シミュレーション, 塑性変形, 側鎖結合

<Summary> In this paper, we propose a simulation method of human hair which enables plastic deformation such as a permanent wave and bed hair. Although simulation of hair is indispensable for expressing characters such as a human in the field of computer graphics, most previous simulation methods just treat the hair as an elastic body that is easy to simulate. Plastic deformation such as the influence of bed hair and hairdressing is not considered. In the proposed method, we introduce internal chemical bonds, in which actual hair plastically deforms based on its bonds. We simulate these bonds by repeating cutting and recombining process. By combining these with the position based method, a high-speed stable simulation has been realized.

Keywords: hair simulation, plastic deformation, internal chemical bonds

1. はじめに

毛髪の物理シミュレーションは、コンピュータグラフィックス (以下 CG) 分野で人間など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、毛髪が濡れたときに側鎖結合の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

体に濡れたときの、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案し⁵⁾、この手法を用いて高速かつ安定な毛髪の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。

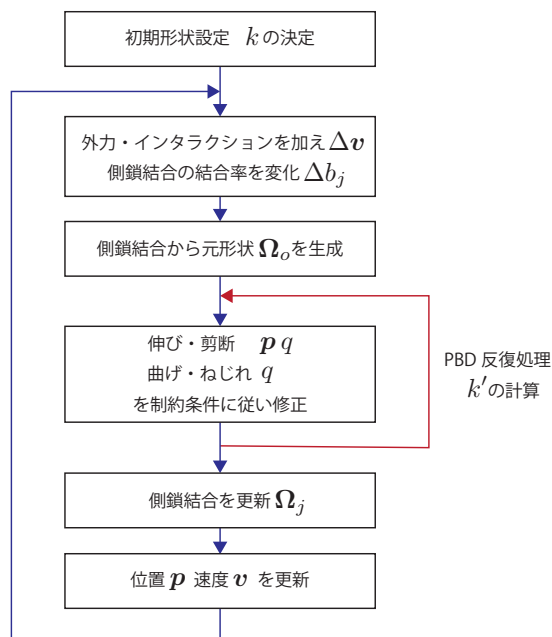


図1 全体の流れ
Fig.1 Flowchart

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レーションを行う。提案手法全体の流れを図1に示す。図中の青矢印は全体の反復を、赤矢印は位置ベース法の反復を示す。図1の各処理について、以下で説明する。

- i. 初期形状設定, k の設定
初期処理として毛髪に初期形状を与え、毛髪上の各頂点に弾性力を表す係数 k を与える(4.2節)。
- ii. 外力・インタラクションを加え側鎖結合の結合率を変化
毛髪に重力や風力などの外力及びインタラクションによる影響を付与する(6章)。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(7.1節)。
- iii. 側鎖結合から元形状を生成
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)。
- iv. 伸び・剪断, 曲げ・ねじれを制約条件に従い修正
前の処理で生成した形状を毛髪の元の形状とみなし、その形状に戻るよう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)。
- v. 側鎖結合を更新
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)。
- vi. 位置, 速度を更新
次ステップの頂点位置を更新し、その移動量から次ス

トップの速度を求めて更新する。

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 Kugelschadt らの手法⁸⁾を用いる。この手法では、ある計算点 \mathbf{p}_1 と、それと隣り合う計算点 \mathbf{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、 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 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 (四元数) 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 Darboux ベクトルである。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。

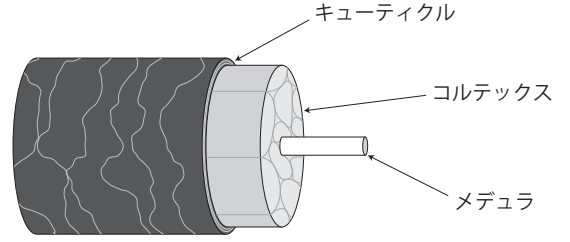


図2 毛髪を構成する層
Fig. 2 Hair structure

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 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¹⁾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⁹⁾。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

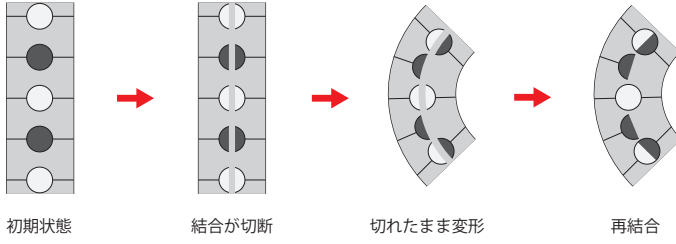


図3 塑性変形が発生する工程
Fig. 3 Process of plastic deformation

みの弾性係数を意味する。提案手法では文献⁹⁾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¹⁾。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つないでいて、側鎖結合によって毛髪はより強固となり、曲げ・ねじれに対する弾性変形を起こしている。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、寝癖やパーマなど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。

- i. 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。
- ii. 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などによりpHが変化すると、切断される。
- iii. 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。
- iv. 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分子レベルで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、結合率と形状を保とうとする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)、(16)が得られる。

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

$$s = \begin{cases} +1 & \text{if } |\Omega - \Omega_j|^2 < |\Omega + \Omega_j|^2 \\ -1 & \text{if } |\Omega - \Omega_j|^2 > |\Omega + \Omega_j|^2 \end{cases} \quad (16)$$

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(17)、(18)に形状の更新に用いる式を示す。

$$\Omega_j \leftarrow \begin{cases} \frac{b_j s \Omega_j + \Delta b_j \Omega}{b_j + \Delta b_j} & \text{if } \Delta b_j > 0 \\ \Omega_j & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$$s = \begin{cases} +1 & \text{if } |\Omega - \Omega_j|^2 < |\Omega + \Omega_j|^2 \\ -1 & \text{if } |\Omega - \Omega_j|^2 > |\Omega + \Omega_j|^2 \end{cases} \quad (18)$$

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及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(19)に風の影響を求める計算式を示す。

$$\Delta \mathbf{v}_w = \alpha \frac{\sin \theta}{(d+1)^2} \hat{\mathbf{w}} \Delta t \quad (19)$$

表 1 各シーンのパラメータ設定
Table 1 Parameters

	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_e	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

ここで、 Δv_w は頂点 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 w のなす角、 \hat{w} は w の単位ベクトル、 d は p から 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たときに、式 (20) で求めたペナルティ力を、外力として頂点の速度に追加する。

$$\Delta v_p = \sum_{j \in C} \begin{cases} \alpha \frac{2r - |\mathbf{p} - \mathbf{p}_j|}{2r} \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{p}_j)}{|\mathbf{p} - \mathbf{p}_j|} \Delta t & \text{if } |\mathbf{p} - \mathbf{p}_j| < 2r \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

ここで、 Δv_p は頂点 p におけるペナルティ力であり、 C は 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 p から辺 j に対して垂線を引いたときの交点座標である。このモデルは毛髪間の距離と反発力に線形な相関があるという仮定による簡易的なものであるため正確なインタラクションの表現ではなく、毛髪のめり込みやすり抜けが発生する。本研究で用いたシーンの設定では、 $\alpha < 10.0$ であれば安定して動作した。

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¹⁰⁾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、このシーン

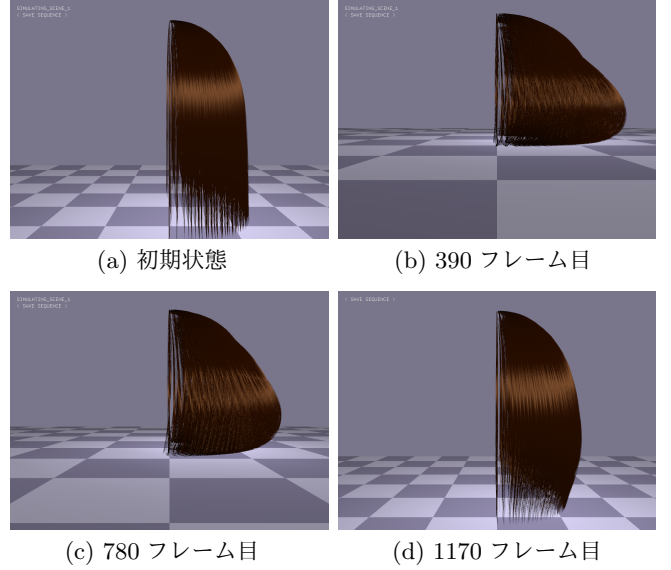


図 4 シーン 1

Fig. 4 Scene 1

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、このシーン内で結合率が変化することはない。以下の式(21)に水素結合の結合率 b_{hyd} を変化させるための式を示す。

$$\Delta b_{\text{hyd}} = \begin{cases} 0.003|\Delta v_w| & \text{if } b_{\text{hyd}} < 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

ここで、 Δv_w は式(19)で求めた風の力である。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

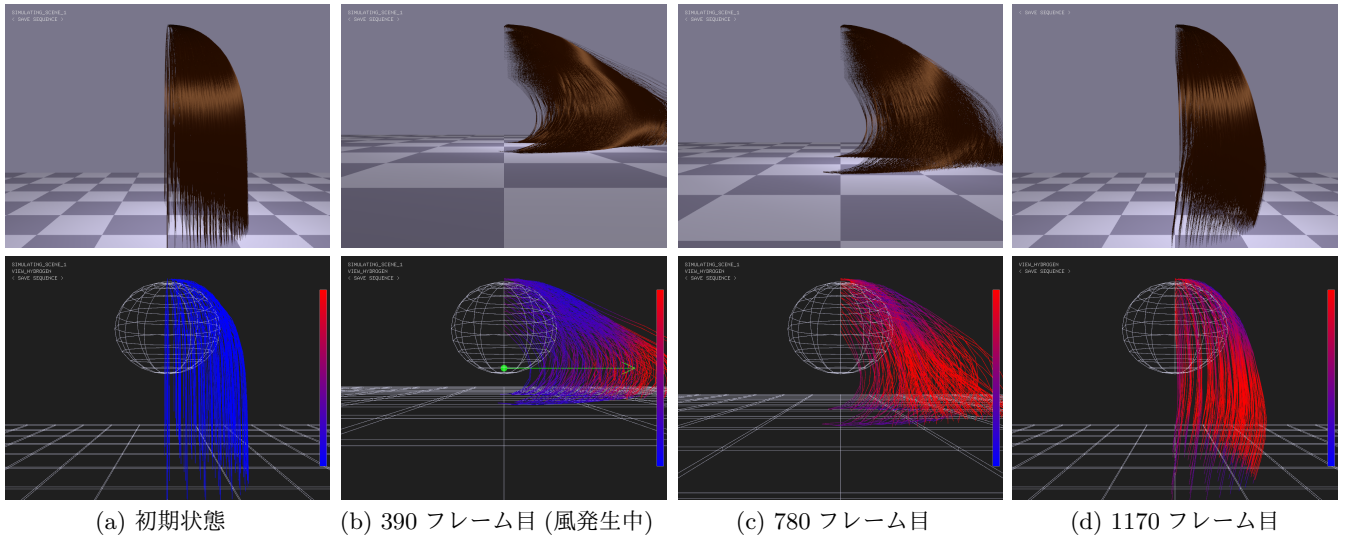


図5 シーン2
Fig.5 Scene 2

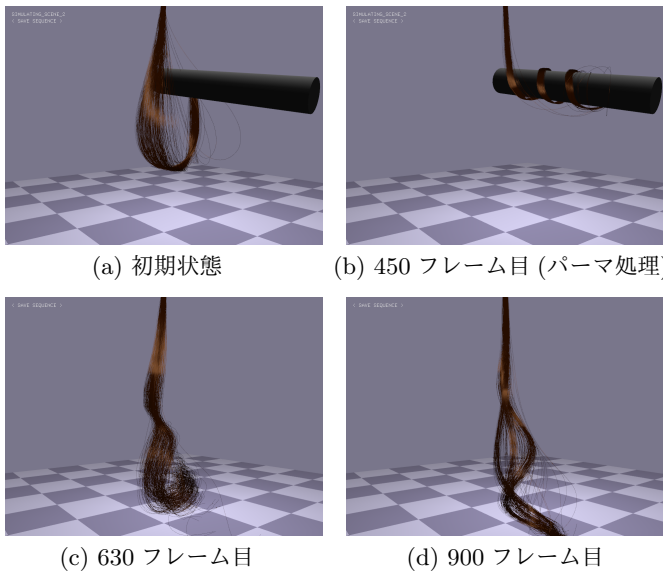


図6 シーン3
Fig.6 Scene 3

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. むすび

本論文では、毛髪の側鎖結合が切断及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。また、側鎖結合の結合率と形状を保とうとする力が比例するという仮定が正しいのか検証が必要である。本物の毛髪を用いた実験¹¹⁾を元に仮定の検証を行い、熱や水分含有量の変化による厳密な側鎖結合のふるまいを軽量のモデルで再現することも今後の課題として挙げられる。

参考文献

- 1) C. R. Robbins, Chemical and Physical Behavior of Human Hair, Springer-Verlag (2012).
- 2) W. Rungjiratananon, Y. Kanamori, T. Nishita: "Wetting Effects in Hair Simulation", Computer Graphics Forum, Vol.31, No.7, pp.1993-2002 (2012).
- 3) W.-C. Lin, W.-K. Liao, C.-H. Lee: "Animating Wet Hair Interacting with Particle-Based Fluid", Proc. of SIGGRAPH Asia 2013 Posters, p.34:1 (2013).
- 4) Y. Fei, H. Maia, C. Batty, C. Zheng, E. Grinspun: "A Multi-Scale Model for Simulating Liquid-Hair Interactions", ACM Trans. on Graphics, Vol.36, No.4, pp.56:1-56:17 (2017).

- 5) 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).
- 6) M. Müller, T.-Y. Kim, N. Chentanez: “Fast Simulation of In-extensible Hair and Fur”, Proc. of 9th Workshop on Virtual Reality Interaction and Physical Simulation (VRIPHYS 2012), pp.39–44 (2012).
- 7) N. Umetani, R. Schmidt, J. Stam: “Position-Based Elastic Rod”, Proc. of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 2014), pp.21–30 (2014).
- 8) T. Kugelstadt, E. Schomer: “Position and Orientation Based Cosserat Rods”, Proc. of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation (SCA 2016), pp.169–178 (2016).
- 9) 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, Vol.36, No.3, pp.207–216 (2002).
- 10) J. T. Kajiya, T. L. Kay: “Rendering Fur with Three Dimensional Textures”, Proc. of 16th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.271–280 (1989).
- 11) 上甲恭平, 山本奈絵子: “毛髪の水セットをベースとした新規ウェーブパーマ施術法”, Journal of Fiber Science and Technology, Vol.73, No.4, pp.94–104 (2017).

(2018年07月18日受付)



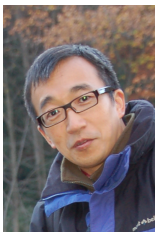
出村 佑史

2018年 筑波大学情報学群情報メディア創成学類卒業。学士(情報メディア科学)。現在、筑波大学大学院図書館情報メディア研究科博士前期課程在学中。物理シミュレーションに関する研究に従事。



藤澤 誠 (正会員)

2005年 静岡大学大学院理工学研究科修士課程修了。2008年 同博士課程修了。同年奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。2011年 筑波大学大学院図書館情報メディア研究科助教。現在に至る。博士(工学)。CG, 物理シミュレーションなどの研究に従事。情報処理学会, 画像電子学会, 日本VR学会, ACM, IEEE CS 各会員。



三河 正彦

1994年 大阪大学大学院機械工学分野修士課程修了。同年 NTT アクセス網研究所入所。2003年 筑波大学図書館情報学系講師。2006年 同大学院図書館情報メディア研究科准教授。現在に至る。博士(工学)。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 日本知能情報ファジィ学会, IEEE 各会員。