

## 濡れた頭髪の対話的なアニメーション生成

## Interactive animation of wet hair

西濱 高志† 床井 浩平‡  
Nishihama Takashi Tokoi Kohei

## 1. はじめに

## 1.1 研究背景

コンピュータグラフィックスにおいて、頭髪の形状はキャラクターの特徴を表現する非常に重要な要素であり、コンピュータグラフィックスを取り入れたコンテンツ制作では必要不可欠なものとなっている。しかし、頭髪の形状は人間の頭部から生える10万本以上の毛髪の複雑な相互作用により決定されるため、忠実に再現しようとする計算量が非常に多くなってしまふ。そのため、これは対話的なアプリケーションにおいてはコストが高いものとなる。しかし、個々の毛髪は非常に細いため、接近して観察しない限り毛髪の形状を知覚することはない。

頭髪のもつこのような2面性から、頭髪の表現のアプローチは、頭髪を全体的な形状の表現に重点を置いて計算量を減らし、対話的なアプリケーションに応用しようとするものと、個々の毛髪の相互作用にもとづいて扱うことでより忠実に頭髪の形状を再現しようとするものがある[1]。また、これらの研究は頭髪の形状(ヘアスタイル)に関するもののほか、頭髪の運動(ヘアシミュレーション)に関するものや、頭髪の陰影(ヘアレンダリング)に関するものの3つのカテゴリに分類される[2]。本研究ではこれら3つのうち頭髪の運動を取り扱う。

頭髪の運動は人体の運動に付随して発生する。コンピュータグラフィックスによる人体のアニメーションの制作ではボーンと呼ばれる骨格を操作して人体の形状を変形させるスキニングという手法が一般的に用いられる。このボーン操作は、アニメーターの手作業により行われるほか、モーションキャプチャシステムにより取得したデータを用いてリアルな運動を再現することも行われている。

しかし、頭髪の全体的な形状は不定形に変化する。このとき、毛髪一本一本にボーンを設定することは現実的ではないため、ボーンは通常ある程度まとまった毛髪の束に対して設定される。ただし、この手法では個々の毛髪の相互作用にもとづいた頭髪の形状変化を再現できないので、濡れた頭髪の運動の再現が難しい。これは、頭髪が濡れた際に発生する毛髪同士の付着や、束の分離による凝集効果が個々の毛髪と水粒子の相互作用により発生するためである。また、頭髪はマーカーを取り付けることも困難なため、毛髪の運動をモーションキャプチャシステムにより取得することも難しい。

このため、頭髪の形状は個々の毛髪の相互作用にもとづいて再現することが一般的である。しかし、濡れた頭髪の場合、個々の毛髪と水粒子の相互作用を考慮する必要があるため、全体的な形状に注目して処理することが難しい、そのため、計算量が非常に多くなってしまい、対話的なアプリケーションに導入することが困難となる。

濡れた頭髪の形状変化として W. Rungjiratananon らは頭髪が濡れた際に引き起こされる水の吸収、拡散、毛髪同士の付着(毛髪の凝集効果)、毛髪内の水の流れ、及び湿った

毛髪上の水の滴りの再現を行っている[3]。また、Wei. Chin らは、流体の影響を受けた毛髪の挙動の再現を行い、毛髪が流体と衝突した際の接触力、浮力、水の表面張力などの外力を考慮した毛髪の挙動に加え、毛髪の凝集効果や濡れた頭髪の陰影表現を行っている[4]。

しかし、これらの手法でも対話的なアプリケーションへのお用は難しく、今後の課題としてGPU上でのシミュレーションの実装による処理の高速化が挙げられている。

## 1.2 研究目的

本研究では対話的なアプリケーションへの応用を目標とした濡れた頭髪の運動に伴う全体的な形状の変化をシミュレーションする手法の開発を行った。

この手法では毛髪一本一本の相互作用にもとづいて頭髪の形状の変化を再現し、個々の毛髪に水粒子による付着力を加味することで濡れた頭髪の運動を再現する。

具体的には頭髪が濡れた際に発生する毛髪の凝集効果を再現する。図1にある通り、頭髪が乾いた状態と濡れた状態を比較すると濡れた頭髪は毛髪がいくつかの束になっていることがわかる。これは水粒子の付着力により毛髪同士が付着したためである。本研究では図1の頭髪のように毛髪同士が付着し、束となって分離していく頭髪の形状の変化の再現を行う。



図1: (a)乾いた状態の頭髪, (b)濡れた状態の頭髪

また、この手法では多数の毛髪と水粒子の相互作用を再現するため計算量が非常に多くなる。そこで、空間分割法を用いることで計算量を少なくし、シミュレーションを行う処理をGPU上実装することで全体的な処理の高速化を行った。

## 2. 提案手法

## 2.1 頭髪の形状変化の再現

頭髪の形状は毛髪の集合体として表現される。この一本一本の毛髪を毛髪上の質点を線分で結んだ折れ線で近似し、

† 和歌山大学大学院システム工学研究科, Graduate School of Systems Engineering, Wakayama University

‡ 和歌山大学システム工学部, Faculty of Systems Engineering, Wakayama University

ばねダンパモデルにもとづいて質点の挙動を制御することで頭髪の形状変化を再現する。

ゴム紐や布のように伸び縮みする弾性体の形状変化は、質量のないばねと質量をもつ質点の集合体として近似され、各質点に加わる力をもとに質点の位置を更新することによって再現する。しかし、ばねの振幅は時間が経過していくごとに減少する。このばねの減衰振動を表現するために質点間の相対的な速度に比例して逆方向の抵抗力(ダンパ)を加えたものがばねダンパモデルである(図2)。

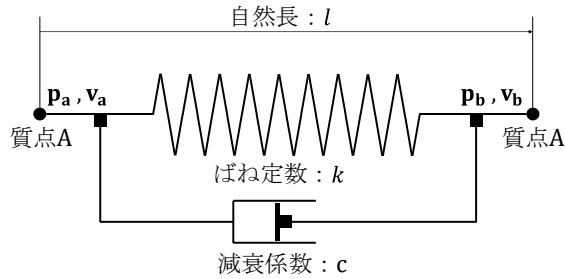


図2：ばねダンパモデル

ある二つの質点の位置を $\mathbf{p}_a$ と $\mathbf{p}_b$ 、その質点における速度を $\mathbf{v}_a$ と $\mathbf{v}_b$ 、ばね定数を $k$ 、自然長を $l$ 、ダンパによる減衰係数を $c$ とすると、この二つの点を結ぶばねの力 $\mathbf{f}$ は式(1)で求めることができる。

$$\mathbf{f} = -k(|\mathbf{p}_b - \mathbf{p}_a| - l) \frac{\mathbf{p}_b - \mathbf{p}_a}{|\mathbf{p}_b - \mathbf{p}_a|} - c(|\mathbf{v}_b - \mathbf{v}_a|) \frac{\mathbf{v}_b - \mathbf{v}_a}{|\mathbf{v}_b - \mathbf{v}_a|} \quad (1)$$

本研究では毛髪上の質点を図3のように隣接した質点をばねダンパモデルで結び、各質点の動きを式(1)に従って制御することで頭髪の形状変化を再現する。

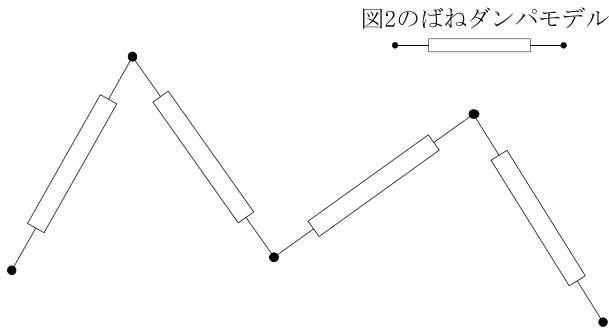


図3：一本の毛髪のモデル

また、物体は重力など外力の影響を受けて形状が変形する際、元に戻ろうとする抵抗力が発生する。これを応力という。

毛髪もまた、重力に従って曲がる際に応力が発生する。これは、図3の隣接した質点のみでは再現することができない。そのため、さらに外側の質点との間をばねダンパモデルで結ぶことで毛髪に加わる応力を再現する(図4)。

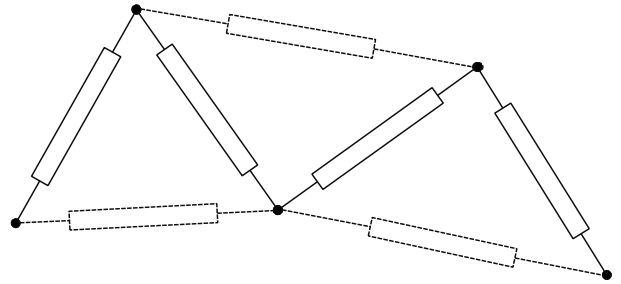


図4：応力を考慮した毛髪のモデル

## 2.2 濡れた頭髪の形状変化の制御

頭髪は毛髪に水粒子が付着することで濡れた状態になり、毛髪による水の吸収、拡散、毛髪の凝集効果、吸収された水の毛髪内での移動が発生する。

本研究ではこれらの中でも毛髪の凝集効果による毛髪同士の付着、束の分離を表現することで頭髪が濡れた際の形状変化を再現する。具体的には頭髪の領域に水粒子を撒布し、個々の水粒子と近傍にある毛髪上の質点との間に付着力を設定することで毛髪同士の付着を再現する。

毛髪上の質点 $i$ の位置を $\mathbf{p}_i$ 、水粒子 $j$ の位置を $\mathbf{p}_j$ 、水粒子 $j$ の半径を $r_{min}$ 、水粒子 $j$ の影響範囲を $r_{max}$ とし、式(2)を用いることで質点 $i$ に加味される水粒子 $j$ による付着力 $\mathbf{f}_a$ を求めらる。

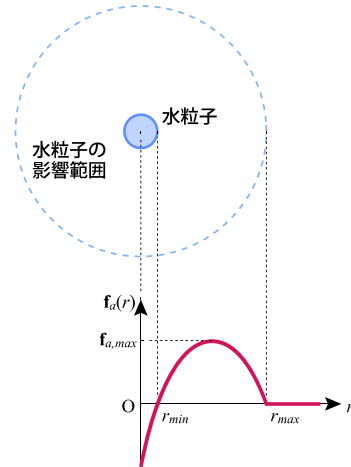


図5：水粒子の影響範囲と付着力

$$\mathbf{f}_a = \begin{cases} 1 - \left( \frac{2|\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i| - r_{min} - r_{max}}{r_{min} - r_{max}} \right)^2 & 0 \leq |\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i| \leq r_{max} \\ 0 & |\mathbf{p}_j - \mathbf{p}_i| > r_{max} \end{cases} \quad (2)$$

これを式(1)の外力に加えることで、濡れた頭髪の形状変化を再現する。

## 2.3 頭髪の陰影付け

毛髪は細く、毛髪を円筒で近似したとしても、単独では陰影の観測に十分な反射面を持たない。しかし、その集合体である頭髪は個々の毛髪による反射光が合成されて、独特な陰影を形成する。そこで本研究では最も単純な異方性反射モデルである Kajiya-Kay の BRDF モデルを用いて頭髪の陰影を表現する。

Kajiya-Kay の BRDF モデルは毛髪上の任意の質点をその質点における接線を軸とする円柱でモデル化することによ

り、各点の拡散反射光の反射率と鏡面反射光の反射率を求め、頭髪全体の異方性反射を再現する手法である。各質点における接線の傾きは式(4)で求めた接線と同じものとして取り扱う。

曲線上の各質点における接線ベクトルを  $\mathbf{t}$ 、入射光ベクトルを  $\mathbf{l}$ 、法線ベクトルを  $\mathbf{v}$ 、 $\theta'_i$  を  $\mathbf{l}$  が  $\mathbf{t}$  と直行する平面となす角、 $\alpha'_i$  を  $\mathbf{l}$  の正反射ベクトル  $\mathbf{r}'$  が  $\mathbf{t}$  と直行する平面となす角としたときその点における、拡散反射光の反射率  $\cos \theta'_i$ 、鏡面反射光の反射率  $\sin \alpha'_i$  は式(3)で表すことができる。

$$\begin{aligned} \cos \theta'_i &= \sqrt{1 - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{t})^2} \\ \sin \alpha'_i &= \max(\sqrt{1 - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{t})^2} \sqrt{1 - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{t})^2} - (\mathbf{l} \cdot \mathbf{t})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{t}), 0) \end{aligned} \quad (3)$$

この拡散反射光と鏡面反射光を用いた 2 色性反射モデルを用いることで頭髪の陰影付けを再現する。

#### 2.4 空間分割法を用いた水粒子探索

本研究では毛髪上の質点が水粒子の影響半径内に存在するかの判定を行う必要がある。この際、個々の質点に対しすべての水粒子との距離を測ることで忠実なアニメーションを生成することができる。しかし、質点と水粒子の総数の増加に従って判定を行う回数が急増してしまう。このため、空間分割法を用いて接触判定を行う回数を削減し、処理の削減をする。

空間分割法は空間を小さい領域に分割することにより、空間内にあるオブジェクトがどの領域に属しているのかを常に把握し、その領域内にあるオブジェクト同士でのみ接触判定など様々な判定を行うことで計算量を削減する手法である。

空間を分割する際、効果的な方法は規則的な格子を空間に重ねて、空間を同じ大きさの領域に分割することである。この方法を用いて特定のオブジェクトがどの領域に存在しているかの関連付けを単純かつ高速に行うことができる。このように空間を等分に分割する手法は等分分割法と呼ばれる。

水粒子と領域の関連付けは分割する空間を立方体と仮定し、オブジェクトを構成する頂点座標を用いることで行うことができる。次元数を 3、分割する空間(立方体)の一边の長さを 1、1 辺の格子の数を  $N$ 、水粒子の中心位置  $\mathbf{p}$  の座標を  $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$  とすると、 $\mathbf{p}$  が存在する領域の位置  $\mathbf{C} = (C_x, C_y, C_z)$  は式(4)により算出できる。

$$\mathbf{C} = \left\lfloor \frac{\mathbf{p} + 1}{N} \right\rfloor \quad (4)$$

また、算出された領域の位置  $\mathbf{C} = (C_x, C_y, C_z)$  を 3 つの要素ではなく、1 つの要素  $A$  で表すと次のようになる。

$$A = C_z + N C_y + N^2 C_x \quad (5)$$

このように各水粒子に対し、式(4)、式(5)を用いて算出した領域の番号を割り当てることにより水粒子と領域を関連付ける。

#### 2.5 GPU 上への実装

本研究では毛髪と水粒子の相互作用を再現するため計算量が非常に多くなる。そこでシミュレーション

処理を GPU(Graphics Processing Unit)に実装することで GPU の並列計算による計算速度の高速化を行った。

GPU による図形の描画は CPU(Central Processing Unit)から GPU のメモリである VBO(Vertex Buffer Object)に頂点の座標値などの頂点情報を格納した後、描画命令を発行することで実行する。また、VBO に格納された頂点情報に変更がない限り、VBO に格納されたデータを再び用いることで繰り返し描画を行うことができる。

しかし、頭髪の運動など、物体の形状変化が伴うアニメーションの生成では、頂点情報を 1 ステップごとに変更していく処理を CPU 上へ実装し、外部バスを介して VBO に変更したデータを転送する必要がある。この転送速度は CPU や GPU の動作速度に対し非常に遅く、CPU や GPU の動作をデータの転送が完了するまで一時停止させる必要がある。そのため CPU から GPU へのデータの転送が頻繁に行われると CPU や GPU は本来の性能を発揮できなくなってしまう。

そこで、本研究では CPU から GPU にデータの初期値だけを送り、データの更新処理を GPU 上で行う。これにより、データを転送する回数を削減し、計算速度の高速化を図る。

提案手法では、GPU 上で実行する質点の位置の算出をばねダンパモデルと水粒子の付着力にもとづいた質点に加わる力を計算する処理と質点と水粒子の位置を更新する処理によって決定する。

質点の位置を GPU 上で更新するには提案手法により算出した質点のデータを再び更新処理の入力となる GPU のメモリに格納する必要がある。しかし、GPU 上では入力として使用したメモリに再び格納することはできない。そこで、メモリを二つ用意し、一方をデータの入力に用いる際は、もう一方を更新したデータを格納する場所として用いる。

また、GPU 上で力の計算を行うには GPU のメモリから質点の情報を参照する必要がある。しかし、GPU 上のメモリからは一度に一つの質点のデータしか参照することができない。そこで、メモリに格納されているデータをまとめてテクスチャのデータとして扱う。GPU 上ではテクスチャのデータを複数参照することができるため参照したいメモリに対し、GPU 上でも任意の要素に対しランダムアクセスすることができるようになる。

### 3. 実験

提案手法を用いて作成したプログラムの処理時間、および描画する毛髪の凝集効果による毛髪同士の付着、束の分離を計測する。

実験には FUJITU FMV D04007(OS Windows10, CPU Intel(R) Core(TM)i5-3470, メモリ 10.0GB, GPU NVIDIA GeForce GT 630)を使用した。

表 1 に水粒子の数に対する、1 フレームごとの毛髪のレンダリング時間、図 6 に水粒子 0 個と水粒子 1000 個の場合の頭髪の形状を示す。なお、毛髪一本における毛髪上の質点の数を 6 個、毛髪の本数を 1 万本、1 フレームごとの更新処理の繰り返し回数を 4 回、処理時間を 1000 フレーム繰り返したときの処理時間の平均値と設定し、計測を行った。

表 1：水粒子の個数に対するレンダリング時間

水粒子の個数(個)	レンダリング時間(ms)
0	22.350
20	46.912
40	57.898
60	71.668
80	78.042
100	78.930

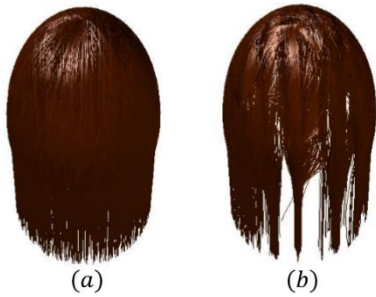


図 6：(a)水粒子 0 個，(b)水粒子 1000 個

表 1 より水粒子の数が増えていくにしたがって、レンダリング時間の増加量が少なくなっていることがわかる。これは空間分割法による処理の削減が効果的に働いているためである。また、平均的なレンダリング時間がリアルタイムレンダリングに求められる時間である 16.67 ミリ秒を上回っている。

また、図 6 より水粒子の数が 1000 個の場合、毛髪同士の付着し、凝集していることがわかる。

#### 4. おわりに

本研究では、濡れた頭髪において発生する毛髪の凝集効果を再現するため、毛髪と水粒子の相互作用を式(2)でモデル化し、ばねダンパモデルと水粒子による付着力を用いて毛髪の制御を行った。結果として図 6 に示した通り、毛髪の凝集効果を再現することができた。また、空間分割法を用いて計算量を削減し、提案した手法を GPU 上に実装することにより、リアルタイムでシミュレーションを実行することができた。

しかし、本研究には以下の 2 つの考慮すべき問題点が挙げられる。

1 つ目は対話的なコンテンツへの導入を行うにはレンダリング時間が長いこと、難しいということである。これは 1 フレームにおけるシミュレーションの間隔( $\Delta t$ )を大きくすることでレンダリングを行う時間を短くし、解決することができる。しかし、シミュレーションの間隔( $\Delta t$ )を大きくすると頭髪の形状が発散してしまう。そこで、陰解法と陽解法の安定性と計算効率を兼ね揃えた無条件安定陽解法を用いることによって頭髪の形状が発散せず、レンダリングを行う時間を短くすることができると考えられる。

2 つ目は濡れた頭髪の形状変化の再現性についてである。本研究では 1 フレームにおける水粒子の位置を質点と同じものとして扱ったため、現実の濡れた頭髪の形状変化を完全に再現できているとは言えない。そこで、[3][4]における水粒子の付着、流体と衝突した際に受ける力、毛髪上における水粒子の滴りを再現することでより忠実な濡れた頭髪の形状変化を再現できると考えられる。しかし、これら表現するにはより複雑でコストの高い計算を行わなけれ

ばならない。そのため、より処理の高速化をする必要があると考えられる。

#### 5. 参考文献

- [1] Ward,Kelly,et al. "Asurvey on hair modeling: Styling, simulation,and rendering."Visualization and Computer Graphics,IEEE Transactions on 13.2.pp.213-234.2007.
- [2] Magnentat-Thalman,Nadia,Sunil Hadap,and Prem Kalra. "State of the art in hair simulation."International Workshop on Human Modeling and Animation.Korea Computer Graphics Society,2000.
- [3] Rungjiratananon, Witawat and Kanamori, Yoshihiro and Nishita, Tomoyuki "Wetting effects in hair simulation" Computer Graphics Forum.31,7,pp.1993-2002,2012.
- [4] Wei.Chin,Wei-Kai Liaoy,Chao-Hua Lee. "Animating Wet Hair Interacting with Particle Based Fluid."SIGGRAPH Asia 2013 Posters.34,2013.