

短繊維で構成された凝集体の表現

櫻井快勢[†] 宮田一乗^{††}

本報告では、綿やウールのような短繊維で構成された凝集体の表現手法を提案する。多くの繊維の凝集体の表現手法は、毛皮など密に集まった繊維を対象としているが、本手法では、埃など比較的疎な集合を対象とする。そのため、集合の外観よりも、繊維の形状が見た目を決定する要素となる。短繊維は捲縮性があり、本手法では、これを制御することでさまざまな短繊維を表現する。端点を連結させた線分で短繊維を構成し、線分の連結部の角度を変えることで、短繊維を捲縮させる。その角度を制限することで捲縮性を設定する。

Representation of An Aggregate Composed of Staple fibers

Kaisei Sakurai[†] Kazunori Miyata^{††}

In this report, we propose a method for representing an aggregate composed of staple fibers such as cotton and wool. Aggregates frequently appear in our daily life, for example dust. To date, several methods have been proposed to render a collection of long fibers such as hair. However, these methods cannot generate sparse aggregates composed of staple fibers. Because the shape of each fiber is noticeable in a sparse aggregate, we generate staple fiber models to construct the aggregate. The fiber model is defined by a polyline to represent various fibers having crimps. By changing angles between neighboring line segments in the polyline, crimps of the fibers are controlled. To confirm effectiveness of our method, we show examples of generated aggregates.

1. はじめに

CGにおいて繊維の表現は、活発に研究されている分野のひとつであり、多くの表現手法が提案されてきた。中でも髪や毛皮、衣類といった長くて密な繊維を対象とした研究が盛んである。その一方で、疎な凝集体の表現が乏しい。

しかしながら、我々の身近には、ほこりに代表される、綿やウールのような短繊維で構成される疎な凝集体が多く存在しており、より現実的なシーンの制作する際に、これらの表現が必須となることが予想される。図1は、身近な短繊維のひとつである体毛(すね毛)を凝集させた写真である。この写真から、個々の繊維が捲縮していることが視認できる。また、繊維は強度を持つため、圧力をかけなければ、繊維自体の形状を維持することが知られており、写真からも視認できる。このような凝集体の表現は



図1 すね毛の凝集体の写真。

既存の手法では難しく、手作業で制作する必要がある。しかしながら、手作業で制作するためには、個々の繊維を形成し、所望の形状に配置する必要があり、極めて高いスキルを要する。これを解決する手段として、プロシージャル

モデリングが有用であると考えられる。これまで、いくつかのプロシージャルモデリングが提案されているが、任意の要素を生成することは難しい。たとえば、L-systemなどの構文によるモデリング法では任意の形状をモデリングできるが、十分なスキルが必要であり、現実的ではない。これらに対して本稿では、捲縮を有した繊維を直感的なパラメータで生成し、任意の外形に凝集させる手法を提案する。

2. 関連研究

本手法は、繊維の表現と凝集体の構成という二つの分野の知見を活用している。これまで、凝集体と繊維はそれぞれの分野で研究されてきた。

2.1 凝集体

凝集体の表現のために、任意の要素で凝集体を構成する手法と特定の要素で凝集体を構成する手法の二種類の手法が提案されてきた。前者の代表的な手法としては以下の研究例が挙げられる。すなわち、物理シミュレーションを用いて積み上げる手法[3, 9]、3次元のサンプルから同様の構造を持つ集合体を生成する3次元のテクスチャシネシス [16]、指定した外形を近似するように要素を配置する3D collage [5]、隙間なく繰り返しパターンを生成するEscherization [12]、任意要素のモザイク[13]、Poisson-disk distributionを用いたオブジェクト配置法である Object distribution function [14]などである。しかしながら、いずれの手法でも、繊維のように細長い物体を凝集し、任意の形状を近似することは難しい。

[†]北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
Japan Advanced Institute of Science and Technology, School of knowledge science

^{††}北陸先端科学技術大学院大学 ライフスタイルデザイン研究センター
Japan Advanced Institute of Science and Technology, Research Center for Innovative Lifestyle Design

後者はプロシージャルモデリングと呼称され、幅広く活用されている。代表的な手法としては Perlin が提案したテクスチャ生成手法が挙げられ、煙、布地、岩肌などの表現が可能である [4, 19]。Worley が提案した細胞のような形状を生成する Cellular texture も活用されている [25]。また、2次元の一般的なモザイク[7]や木 [17]、街 [18]、堆積された石[20]などを対象とした手法も提案されている。プロシージャルモデリングでは要素の形状をパラメータ化しており、多様なオブジェクトを生成することができる。本手法では、さまざまな短繊維を形成するために、このプロシージャルモデリングのアプローチを用いる。

2.2 繊維の表現

古くから、髪の毛や毛皮などの長い繊維でかつ、密な繊維の集合を表現する手法が研究されてきた[11, 6, 15, 1]。これらの手法は、毛の流れや密度、動きをレンダリングに反映させることで、写実的な表現を可能にしてきた。また、衣類のアニメーション[23,22]や質感表現[24,10]が提案されている。これらの手法では、巨視的視点で繊維を表現するため、個々の繊維の形状をほとんど考慮しない。一方で、繊維に注目した表現手法も提案されており、毛羽立った布地のテクスチャ生成[21]などが挙げられる。文献[21]の手法では、毛羽立った布地では繊維が視認できるため、形状モデリングを行った。本手法でも、視認できる繊維に注目しているため、形状をモデリングする。

3. 短繊維の凝集体の形成

本手法では、任意の形状に沿った短繊維の凝集体を生成する。入力のパラメータから短繊維を手続き的に生成した後、指定した凝集体外形に近似するように配置する。

3.1 短繊維のモデリング

短繊維とは短い繊維の総称であり、種類ごとに個別の繊維長や捲縮性を持つ。それらを表現するためには、自由曲線が好ましいと考える。本手法では、繊維の表現として、単純なデータ構造で自由曲線を表現するポリライン(英名 Polyline, Polygonal chain)と称される連結された線分を用いる。図 2 に示すように長さや湾曲を自由に定めることができ、さまざまな短繊維を表現が可能である。制御性を考慮するとベクトル場など用いるパーティクルシステム [11]の制御よりも簡単と考える。

短繊維の捲縮を表現するために、ポリラインを局所的に湾曲させる。局所的な湾曲は曲率で定義できるが、三次元空間内では指定が難しい。そこで、本手法では、隣接する線分に角度を付与することで、三次元空間内の湾曲を指定する。図 3 に三頂点(v_0, v_1, v_2)を頂点に持つポリラインで、線分 $v_1 v_2$ の角度設定の模式図を示す。本手法では頂

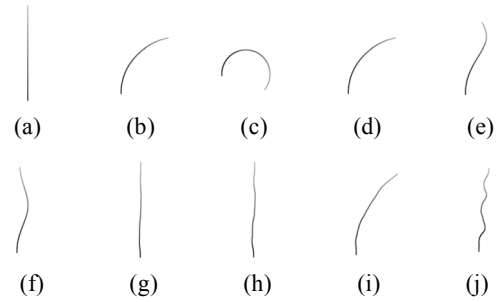


図 2 ポリラインの例.

表 1 図 2 のパラメータ.

φ_{\max} と φ_{\min} は仰角の範囲の最大値と最小値。 θ_{\max} と θ_{\min} は方位角の範囲の最大値と最小値。角度の単位は degree.

	φ_{\max}	φ_{\min}	θ_{\max}	θ_{\min}
(a)	0	0	0	0
(b)	0	0	3.6	3.6
(c)	0	0	7.2	7.2
(d)	3.6	3.6	3.6	3.6
(e)	7.2	7.2	3.6	3.6
(f)	10.8	10.8	3.6	3.6
(g)	0	0	3.6	-3.6
(h)	0	0	7.2	-7.2
(i)	0	0	7.2	-3.6
(j)	39.6	21.0	18.0	-3.6

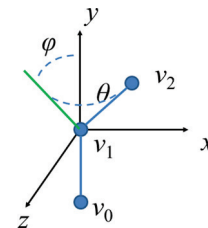


図 3 ポリラインの角度の設定.

点のインデックス順に角度を付与していく。はじめの線分(線分 $v_0 v_1$)は必ず y 軸上に配置する。線分の角度は、仰角 φ と方位角 θ で指定する。仰角 φ はローカル座標での x 軸回りで y 軸を 0° とする角度とし、方位角 θ は y 軸回りで x 軸を 0° とする角度とする。仰角 φ 、方位角 θ の順に回転させることで角度を付与する。角度 (φ, θ) の回転を回転行列 \mathbf{A} で表記とすると、 i 番目の頂点のローカル座標での回転は、式(1)の回転行列 \mathbf{A}_i となる。

$$\mathbf{A}_i = \sum_{j=1}^i \mathbf{A}_j \quad (1)$$

捲縮のための仰角と方位角は、範囲(最大値 $\varphi_{\max}, \theta_{\max}$ と最小値 $\varphi_{\min}, \theta_{\min}$)で指定する。範囲内においてランダムに決定された角度 (φ, θ) を各頂点に付与することで、多様な捲縮を表現する。以上の手法で、図 2 に示すような 3 次元上の

緩やかな曲線から起伏が激しい曲線、巻いた曲線などを指定できる。このときのパラメータを表 1 に記す。ただし、仰角と方位角が同じであっても、ポリラインの頂点数に依存して、捲縮が異なるため、本稿では、頂点数を 32 点に固定して実験する。

3.2 凝集体の形成

1 章で前述したように凝集体内であっても、圧力を加えない状態では、短繊維の形状は大きく変形しない。これを考慮すると、短繊維自体の変形を避けたほうが自然な見たいを得られると考えられる。自然さを得るために、本手法では、短繊維を変形せずに凝集体を形成する。しかし、短繊維の捲縮が緩く、凝集体の外形の曲率が高い場合や小さい場合、短繊維が指定した凝集体に収まらない可能性がある。この可能性を考慮して、凝集体の外形を近似するように短繊維を配置する。本手法では、1) 初期配置と 2) 調整処理のふたつの処理を行う。それぞれの処理例を図 4 に示す。

1) 初期配置では、図 4(a)のように指定した凝集体外形の内側に短繊維をランダムに配置する。この時、短繊維の中央の頂点の位置を凝集体の内側に配置する。仮に、全ての頂点を外形の内側に入れるように内外判定すると、曲率によっては全く配置されないことが考えられるので、中央の一点だけで内外判定する。

2) 調整処理では、短繊維を平行移動および回転移動させながら、凝集体の外形の内側に収まるように調整する。図 4(b)のように移動が収束した時点で調整を終了する。

以上の処理で、指定した形状に近似した短繊維の凝集体を形成する。

凝集体外形の指定は、密な外形表面上の頂点とその法線方向とする。メッシュで形状が指定された場合、十分な密度になるように細分割[2]する。ただし、特異点を有するメッシュの場合、細分割の変形により形状が大きく変わるため、変形処理を省く。

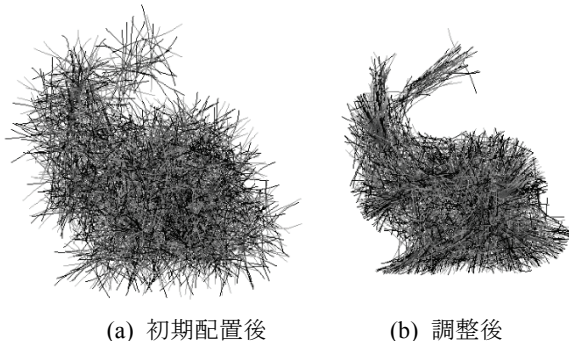


図 4 凝集体の形成の過程。

3.2.1 初期配置

凝集体内に短繊維を配置するために、凝集体外形の内外を定める必要がある。物体の内外は、ボクセルや陰関数表

現などのボリュームデータで定義できる。本手法では、そのひとつである符号付き距離[8]で定義する。符号付き距離は、前処理が法線方向を計算するのみであるため、他のボリュームデータに比べて前処理が短い。OpenCL などの GPGPU ライブラリにより演算が高速になったため、前処理の時間短いことは利点となる。法線方向 \mathbf{n} を持つ凝集体の外形上の点 \mathbf{v} から任意の点 \mathbf{x} までの符号付き距離 d は、式(2)で定義する。

$$d(\mathbf{x}) = a(\mathbf{x})|\mathbf{x} - \mathbf{v}| \quad (2)$$

$$a(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1 & \text{if } (\mathbf{x} - \mathbf{v}) \cdot \mathbf{n} < 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

ここでは、点 \mathbf{v} は \mathbf{x} からの最近傍の頂点とし、法線方向 \mathbf{n} は事前に設定されているとする。符号付き距離にカラーマップを適用した結果を図 5 (a)に示す。頂点を黒色で描画し、バウンディングボックス内にランダムに点を発生させ、各点で符号付き距離を計算した。カラーマップは赤い領域が低く、緑、青の順で高い。

符号付き距離が正の値を示す位置を内側として、指定数の短繊維を配置する。このとき、前述のように短繊維の中央のみを内外判定する。指定数の配置が終了するまで、凝集体のバウンディングボックス内でランダムにサンプリングする。図 5 (b) に 2048 本の短繊維を配置した結果を示す。このとき、短繊維はランダムに中央点の内外判定のみで配置されるため、短繊維の頂点が凝集体外形の外に出ていることがわかる。これらを外形の内側に収めるために次工程の調整処理を行う。

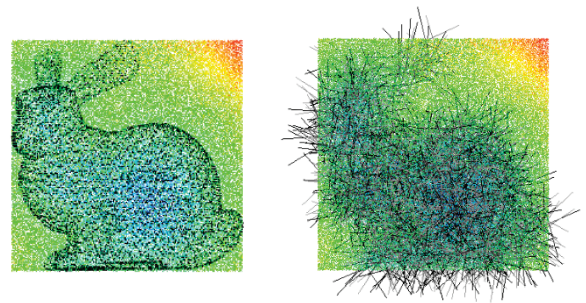


図 5 繊維の初期配置。

3.2.2 調整

調整処理では、後述の評価関数を用いた移動を反復的に行うことで、短繊維を凝集体外形に可能な限り収まるようにする。図 6 (a) から(d) はそれぞれ 5 回ずつ反復回数を増やした結果であり、徐々に凝集体外形内に収まる様子がわかる。本手法では、この反復処理を定常状態になるまで繰り返す。定常状態は、すべての短繊維が移動しなくなった状態とする。評価関数は、式(3)で定義する。

$$C(\mathbf{X}) = \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathbf{X}} d(\mathbf{x}_i) \quad (3)$$

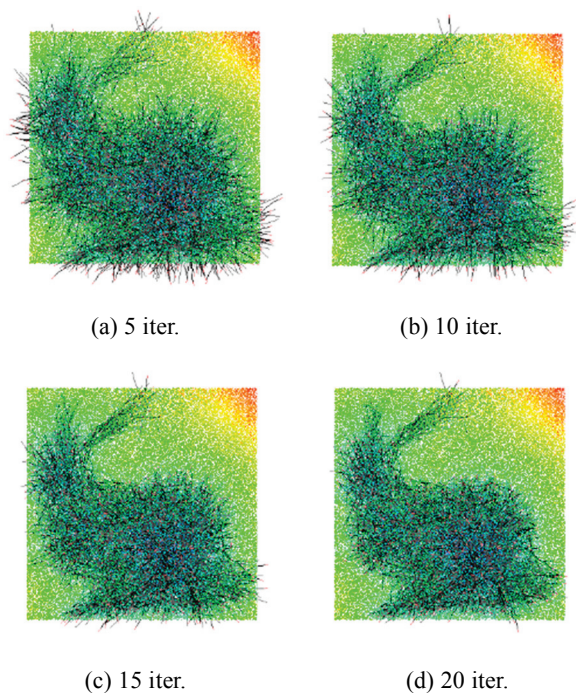


図 6 調整の推移.

このとき \mathbf{X} は各短繊維内の全頂点を示す. この評価関数 C は, 短繊維の頂点上の符号付き距離 d (前述の式(2))の総和であり, 凝集体外形の内側にあるほうが大きな値を示す. 評価関数 C は, 位置と姿勢に依存する複雑な非線形方程式

であるため, ニュートン法などの一般的な最適化手法では解が求まらない可能性がある. そのため, 平行移動 3 軸と回転 3 軸で, それぞれ正負の変位 (12 座標変換) で, 評価関数 C が最大となる座標変換を反復して行う. 平行移動は, x, y, z のそれぞれの軸上で指定の移動量だけ移動する. 回転は x, y, z 軸を回転軸として, 指定の回転量だけ回転させる.

本手法では, 短繊維同士の干渉は考慮せず, 位置と姿勢のみに依存して, 短繊維の移動が決定される. そのため, 短繊維の移動中に過去の軌跡と同じ位置と姿勢になったとき, 今後の移動でも収まることにならないことがわかる. このとき, その短繊維の移動を終了する.

符号付き距離 d が負の値を示す頂点を含む短繊維のみを調整の対象とする. すべての頂点が凝集体の内側にある短繊維には行わない.

4. 結果

本手法は, 幾何計算ライブラリ CGAL と GPGPU ライブラリ OpenCL を用いて C++ で実装した. 実験の環境は, CPU : Intel Core i7 950 (3.07 GHz), メモリ : 12.0 GB RAM, OS : Windows7 64bit, GPU : NVIDIA GeForce GTX 570 の構成である.

短繊維はポリラインで構成しているが, レンダリング時には, 細いシリンダとして形状を出力した.

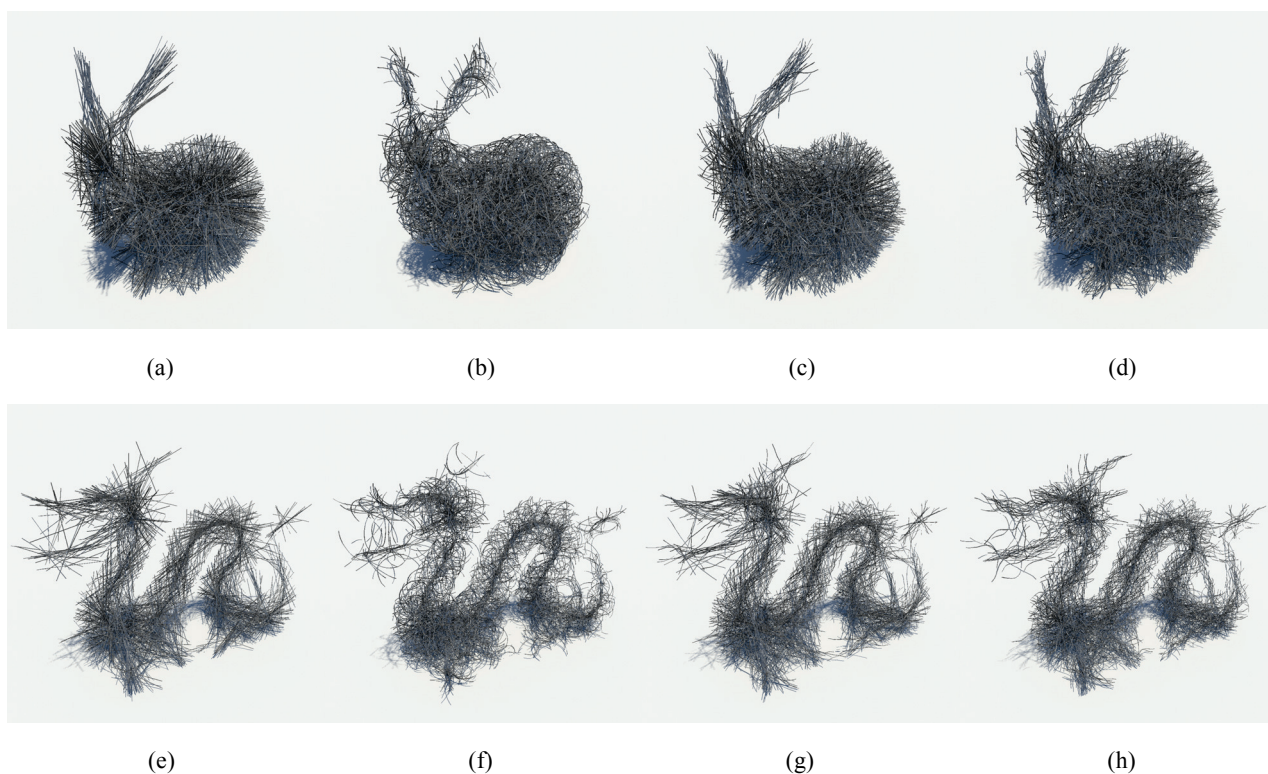


図 7 捲縮の違い.

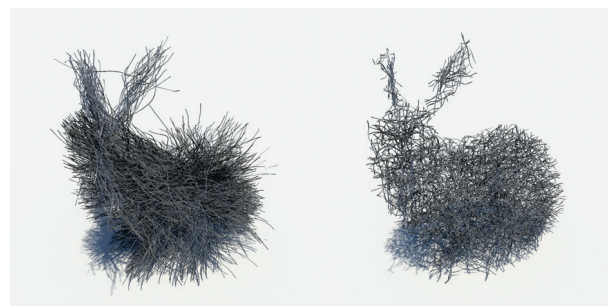
表 2 図 7 の捲縮のパラメータと計算時間.

t_1 は初期配置の計算時間, t_2 は 1 回の調整の平均時間, I は調整の反復回数とする.

	φ_{\max}	φ_{\min}	θ_{\max}	θ_{\min}	t_1	t_2	I
(a)	0	0	0	0	0.015	0.860	35
(b)	0	0	10.8	0	0.016	0.860	54
(c)	0	0	10.8	-10.8	0.016	0.860	37
(d)	36.0	0	10.8	0	0.016	0.835	31
(e)	0	0	0	0	0.016	1.210	28
(f)	0	0	10.8	0	0.016	1.202	37
(g)	0	0	10.8	-10.8	0.016	1.217	27
(h)	36.0	0	10.8	0	0.016	1.201	30

図 7 に異なる捲縮を与えた短繊維で凝集体を生成した結果を示す. それぞれの捲縮のパラメータと計算時間を表 2 に示す. 配置した短繊維の数はすべて 2048 本とし, 繊維長は 10.0 とした. 短繊維は, 図 7 (a)と(e)では直線であり, (b)と(f)では一方向に湾曲し, (c)と(g)では揺らぎを有し, (d)と(h)では, 渦を巻くように設定した. すべての結果から凝集体外形に合わせて, 短繊維の凝集体を生成できたことが視認できる. 図 7 (b)は湾曲した短繊維を生成したため, モデルの背中の緩い曲面に沿って配置されているが, (a)と(c), (d)は一方向に長い短繊維であるため, (b)より内側に多く配置されている. 一方, モデルの耳の部分では, 一方向に長い(a)と(c), (d)のほうが(b)よりも収まっているように見える. 図 7 (e)-(h)の結果も同様である. 計算時間に関して, 初期配置の時間は(a)-(h)の全てにおいて大きな違いはない. 一方, 調整の平均時間は, (a)-(d)と(e)-(h)に隔たりがあり, 凝集体外形に依存している. これは処理する頂点数に依存すると考える. 本実験では, GPU を用いて計算しているため, 負荷が大きな処理は並列化されている. そのため, 演算量に依存しないように思えるが, CPU-GPU 間のデータ転送時間はデータ量に依存する. そのため, 頂点数が多いドラゴンでは長くなったと考える. 調整の反復回数は, 凝集体外形に関わらず, 一方向に湾曲している(b)と(f)が多い. これはバニーの耳やドラゴンの体のように管状の形状では, 湾曲した形状では近似しにくいと考える. また, 調整の反復回数は, (a)-(d)と(e)-(h)では, 全体的に前者の方が多く, 短繊維の形状のみではなく, 凝集体外形にも依存することがわかる.

図 8 に異なる長さの短繊維で凝集体を形成した結果を示す. それぞれの繊維長と計算時間を表 3 に示す. 捲縮のパラメータは, 図 7 (d)の値を用いた. 配置した短繊維の数は 2048 本とした. 図 8 (a)では, 図 7 (d)と比べて繊維が長く, 図 8 (b)では短い. 図 8 (a)では, 繊維がモデルの背には配置されず, 顔から尻尾にかけて集中したことが視認できる. これは, 本手法が外形の収まりやすい位置に収束

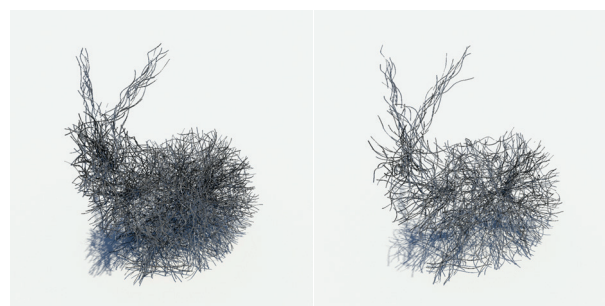


(a) (b)

図 8 短繊維の長さの違い.

表 3 図 8 の繊維長のパラメータと計算時間. l は繊維長.

	l	t_1	t_2	I
(a)	20.0	0.016	0.863	71
(b)	5.0	0.016	0.859	17



(a) (b)

図 9 短繊維の数の違い.

表 4 図 9 の短繊維の数と計算時間. num は短繊維の数.

	num	t_1	t_2	I
(a)	1024	0.016	0.444	31
(b)	512	0.016	0.209	32

するためである. 図 8 (b)では, 図 7 (d) と比べて凝集体外形の表面付近にも短繊維が分布されていることが視認できる. これは外形の内側に入った短繊維は調整しないためである. また, 初期配置で, ランダムに分布したため, 内部にも充填されていることが視認できる. 初期配置と一回の調整の平均時間は概ね図 7 (d) と同じである. これは本手法が計算に用いる頂点数に依存するためである. ただし, 図 8 (a)では調整の反復回数は約 2.3 倍であり, 図 8 (b)では約 0.55 倍である. 誤差はあるが, 反復回数は繊維長に依存することを確認した. 初期配置の位置が同じで, 繊維長が異なるとき, 外形から出ている部分が収まるまで繰り返すため, 繊維長に依存したと考える.

図 9 に凝集体を構成する短繊維の数を変えた結果を示す. それぞれの短繊維の数と計算時間を表 4 に示す. 捲縮のパラメータと繊維長は, 図 7 (d)の値を用いた. 凝集体外形はバニーとした. 短繊維の数が減るにつれ, 凝集体が疎

になることが視認できる。一回の調整の平均時間は、短繊維の数に依存して減衰した。これは計算する頂点数が減少したためである。また、図 7 (d)と調整の反復回数と同じであることから、調整の反復は、繊維長におおよそ依存することが確認できた。

これらのレンダリング画像を用いて、簡単な評価を行った。大学院生 5 名 (全て男性、CG を専門とする 2 名を含む)に、本手法で生成した捲縮した短繊維の凝集体を見せ、繊維の凝集体に見えるか否かを口頭で質問した。結果は、全員が見えると答え、特に 1 名は体毛に見えると答えた。レンダリング結果が黒い繊維としているため、体毛と感じたと考える。

5. 考察とまとめ

本稿では、配置と調整の二つの処理で、短繊維を任意形状に凝集できることを確認した。提案手法では、短繊維はポリラインを用いて表現し、短繊維の捲縮は、隣接する線分の角度を変更することで表現した。

現実では、短繊維同士が接触し、支えあって凝集体を形成するが、本手法では、短繊維同士の接触を判定はしていない。そのため、凝集体を構成する短繊維の数は、現実には異なる。高速な演算によりインタラクティブに所望の数に設定できるが、適切な数を求めることで、より実践的な手法になると考える。また、短繊維の接触による変形を考慮することで、麺類などさらに多様な凝集体が形成できると考える。

また、CPU-GPU の転送量が膨大であると、転送に時間がかかるため、計算時間が長くなる。特に調整の段階で、GPU-CPU 間のデータ転送回数が多いため、転送量を適切にすることで高速化が望める。今後サンプリングやデータ構造を改善することで、より高速な処理を目指す。

謝辞 本研究の一部は科研費 (新学術領域研究 No. 23135513) の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) Bertails F., Hadap S., Cani M.-P., Lin M., Kim T.-Y., Marschner S., Ward K., Kacic-Alesic Z., "Realistic hair simulation: animation and rendering," ACM SIGGRAPH 2008 classes, pp. 89:1-89:154, (2008)
- 2) Catmull E., Clark J., "Recursively Generated B-Spline Surfaces on Arbitrary Topological Meshes," Computer-Aided Design, pp. 350-355, (1978)
- 3) Cho H., "Dressing and modeling food," ACM SIGGRAPH 2007 courses, NY, USA, (2007)
- 4) Ebert D. S., Musgrave F. K., Peachey D., Perlin K., Worley S., "Texturing and Modeling A Procedural Approach Third Edition," Morgan Kaufmann; 3 edition December 16, (2002)
- 5) Gal R., Sorkine O., Popa T., Sheffer A., Cohen-Or D., "3D collage: expressive non-realistic modeling," NPAR '07 Proceedings of the 5th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering, (2007)

- 6) Goldman D. B., "Fake Fur Rendering," SIGGRAPH '97 Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (1997)
- 7) Hausner A., "Simulating decorative mosaics," SIGGRAPH '01 Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (2001)
- 8) Hoppe H., DeRose T., Duchamp T., McDonald J., Stuetzle W., "Surface reconstruction from unorganized points," SIGGRAPH Comput. Graph., Volume 26, 2, July (1992)
- 9) Hsu S.-W., Keyser J., "Piles of objects," ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH Asia 2010, Volume 29 Issue 6, December (2010)
- 10) Irawan, Piti and Marschner, Steve, "Specular reflection from woven cloth," ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 31, 1, pp. 11:1-11:20, January (2012)
- 11) Kajiya J., Kay T. L., "Rendering fur with three dimensional textures," SIGGRAPH Computer Graphics., Volume. 23, 3, pp. 271-280, July (1989)
- 12) Kaplan C. S., Salesin D. H., "Escherization," SIGGRAPH '00 Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (2000)
- 13) Kim J., Pellacini F., "Jigsaw image mosaics," ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2002, Volume 21 Issue 3, July (2002)
- 14) Lagae A., Dutre P., "A procedural object distribution function," ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 24 Issue 4, October (2005)
- 15) Lengyel J., Praun E., Finkelstein A., Hoppe H., "Real-time fur over arbitrary surfaces," I3D '01 Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics, pp. 227-232, (2001)
- 16) Ma C., Wei L.-Y., Tong X., "Discrete element textures," ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2011, Volume 30 Issue 4, July (2011)
- 17) Palubicki W., Horel K., Longay S., Runions A., Lane B., Mech R., Prusinkiewicz P., "Self-organizing tree models for image synthesis," ACM Transactions on Graphics (TOG) - Proceedings of ACM SIGGRAPH 2009, Volume 28 Issue 3, August (2009)
- 18) Parish Y. I. H., Muller P. "Procedural modeling of cities," SIGGRAPH '01 Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (2001)
- 19) Perlin K., Hoffert E. M. "Hypertexture," ACM SIGGRAPH Computer Graphics - Special issue: Proceedings of the 1989 ACM SIGGRAPH, Volume 23 Issue 3, July (1989)
- 20) Peytavie A., Galin E., Merillou S., Grosjean J. "Procedural Generation of Rock Piles Using Aperiodic Tiling," Computer Graphics Forum (Proceedings of Pacific Graphics), Volume 28, Number 7, pp 1801-1810, (2009)
- 21) Sakurai K., Matsufuji K., "A procedural modeling of woven textiles with fuzz," ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Posters, page 58:1, (2009)
- 22) Volino P., Magnenat-Thalmann N., Faure F., "A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation," ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 28, 4, pp. 105:1-105:16, August (2009)
- 23) Wang H., O'Brien J. F., Ramamoorthi R., "Data-driven elastic models for cloth: modeling and measurement," ACM Transactions on Graphics (TOG), Volume 30, pp. 71:1-71:12, July (2011)
- 24) Westin S. H., Arvo J. R., Torrance K. E., "Predicting reflectance functions from complex surfaces," SIGGRAPH Comput. Graph., Volume 26, 2, July (1992)
- 25) Worley S., "A cellular texture basis function," SIGGRAPH '96 Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques, (1996)