

修士論文

平成 22 年度 (2010)

3DCGにおける作画アニメ調
髪束先の形状変形手法に関する研究

東京工科大学大学院

バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻

石塚 真貴男

修士論文

平成 22 年度 (2010)

3DCGにおける作画アニメ調
髪束先の形状変形手法に関する研究

指導教員 渡辺 大地

東京工科大学大学院

バイオ・情報メディア研究科メディアサイエンス専攻

石塚 真貴男

論文の要旨

論文題目	3DCGにおける作画アニメ調 髪束先の形状変形手法に関する研究
執筆者氏名	石塚 真貴男
指導教員	渡辺 大地
キーワード	3DCG NPR 作画アニメ 形状変形 髪束先
[要旨] <p>近年、3次元コンピュータグラフィクス (3DCG) 技術はアニメーションの分野において多く導入されており、3DCGを用いた作画アニメ調の質感表現は、実際のアニメーションにおいて作画アニメと違和感のない形で実現している。しかし作画アニメにおける特徴的な表現には3DCGで実現しにくいものがある。人物の髪において、従来の作画アニメでは動作により髪の形状が複数本に分散・集束といった枝分かれを伴う変形をしている。それに対し3DCGでは、髪の枝分かれを伴う表現はあまり行われていない。3DCGでは移動や回転、拡大といった形状変形は容易に行えるが、髪の枝分かれのように頂点の増減が伴う形状変形は困難となっている。そこで本稿では単純なパラメータ操作で枝分かれ形状が出来れば、効率化が図れると考えた。それに基づき本研究では、髪の形状を少ない入力操作でデザイナーの希望通りに枝分かれした形状に変形できる手法を提案する。髪の束の枝分かれを伴う変形には、軸となるガイド線を使い、ガイド線に沿って形状を掃引体で表した。ガイド線上の任意の点から並列にガイド線を分割することで髪の大局的な形状を損なわずに髪の束が複数本に分散・集束といった形状変化を行った。髪の形状を制御するためのツールを開発し、実際に作画アニメで行われた枝分かれを伴うモーションと本ツールで作成したモーションを比較し有用性を検証した。</p>	

A b s t r a c t

Title	Shape Deformations for Bundle of Hair for Cartoon 3DCG Animation
Author	Sakio Ishizuka
Advisor	Taichi Watanabe
Key Words	3DCG NPR Handwriting-Animated Shape-Deformations Bundle-of-Hair
[summary] <p>In recent years, The 3DCG technology is introduced a lot in the field of the animation, and the handwriting animated cartoon coexists with 3DCG toon render without sense of incongruity in animation. However, there is something where a feature expression of a handwriting animated cartoon is not achieved easily with 3DCG. In person's hair, Shape of the hair does Deformation with branching by the handwriting animated cartoon. On the other hand, in 3DCG The expression with branching of the hair is not done. To the way of branching of the hair though the shape distortion such as the movement, the rotations, and the expansions can be easily done in 3DCG. The shape distortion that the increase and decrease of the vertex is accompanied is difficult. Then, it was thought that efficiency improvement was able to be attempted if the branching shape was able to be generated with a simple parameter operation. In this study, I suggest technique to deform to the shape that branched off that is of the hair by input operation with a few designers as requested. I used a guide line for branching deformation of the hair as an axis, and a sweep did shape along a guide line and generated shape. A bunch of the hair deformed shape to branch off into a plural number without losing wider shape of the hair by dividing a guide line in parallel from the arbitrary position on the guide line. I developed the tool to control the shape of the hair, and shape Deformations of Hair of the handwriting animated cartoon was compared with Shape Deformations of Bundle of Hair with this tool, and the utility of this tool was verified.</p>	

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景	2
1.2	論文構成	11
第2章	提案手法	12
2.1	提案髪モデルの構造	13
2.1.1	基礎形状のガイド線と基礎形状生成	13
2.1.2	髪の子分かれ構造	17
2.1.3	髪の子メッシュ構造	19
2.2	断面図と立体図の双方向操作	22
2.3	子分かれ形状の子補間手法	23
第3章	評価と検証	25
3.1	操作手順	26
3.2	実行結果	27
3.3	現状の問題点	35
第4章	おわりに	39
	謝辞	41
	参考文献	43

目 次

1.1	トゥーン調の髪の色	3
1.2	作画アニメにおける髪の動き	4
1.3	テクスチャによる髪の色	7
1.4	形状モデルによる髪の色	8
1.5	一定のポリゴンによる髪の色	9
2.1	ガイド線の構成	14
2.2	生成した掃引体と目標とする形状	15
2.3	基礎形状の色	16
2.4	$M(u)$ における制御点とガイド線	19
2.5	$M(u)$ における頂点の配置	21
2.6	形状分割の色	22
2.7	枝分かれの編集図	23
3.1	実験結果 1	28
3.2	実験結果 2	30
3.3	実験結果 3	32
3.4	アニメーションの結果	34
3.5	複数の髪束によるアニメーション結果	37
3.6	アニメーション応用	38

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景

近年、コンピュータの高性能化により 3DCG の表現において写実的でフォトリアルな 3DCG 表現だけでなく、様々な表現が可能となっている。人の手によって描かれた線画調や水彩画調、トゥーン調などの非写実的な画像を再現する Non-Photorealistic Rendering(以下 NPR) 表現 [1][2][3][4] が注目され、研究が盛んに行われている。

NPR は従来のアニメにおいて一枚一枚描く手描きでの作業とは異なり、3D 形状データや光源などのシーン情報をコンピュータに計算させることで手描き風の画像を容易に生成出来るため、効率化などの様々なメリットがある。このメリットにより、NPR 技術はトゥーン調の画像が大量に必要なアニメーション制作などに数多く実用されている [5]。アニメーション制作におけるトゥーン調表現の特徴は、対象形状の輪郭線が描画されていることや同系統の色領域内における色の階調が少なく色の境界が鮮明であること、形状の簡略化などが挙げられる。本研究では以後、形状作成方法の違いから平面に 2次元で形状を描いたトゥーン調表現を「作画アニメ」、空間に 3次元で形状を描いたトゥーン調表現を「トゥーン調 3DCG」と呼ぶ。特に区別しない場合は「トゥーン調表現」とする。トゥーン調 3DCG では作画アニメにおいて描写することが難しかった表現ができることや、作画アニメにおける作業の効率化が図れるといったメリットがある。しかし、トゥーン調 3DCG ではコンピュータを用いて正確に動きを表現することが可能であるが、従来作画アニメにおいては物理法則や数学的な正確性をわざと崩した表現がある。この表現がアニメーションのエンターテインメント性を高めている要素であり、このような作画アニメ特有の表現を、トゥーン調 3DCG においても考慮する必要がある。

作画アニメ特有の表現として、動きや形状の誇張表現がある。動きの誇張表現は対象物の動きを極端にすることにより、その動作を印象付けるというものであり、形状に関しては動作の中での臨場感を増すために形状を変形することで、対象の

動作を印象付けるというものである。これらの作画アニメ特有の表現は3DCGにおいても数多く研究 [6][7][8][9] が行われている。このようなアニメ特有の表現はアニメーターの知識や習熟度に依存してしまう傾向にあるが、アニメの質を高める上で必要不可欠であり、3DCG で再現する試みは多くみられる。本研究では従来の作画アニメ特有の動き・形状の中でキャラクターの印象に大きく関わる頭髪表現に着目した。

まず本研究におけるトゥーン調表現の頭髪形状の特徴について説明する。トゥーン調の髪は髪の毛を1本1本描くフォトリアルな表現 [10] と異なり、髪の形状を一定の束のまとまりごとに簡略化して表現している。これは髪の長さや、前髪や後ろ髪にかかわらず多く見られる表現である。トゥーン調の髪の例として、作画アニメの例を図 1.1 左、トゥーン調 3DCG の例を図 1.1 右に示す。

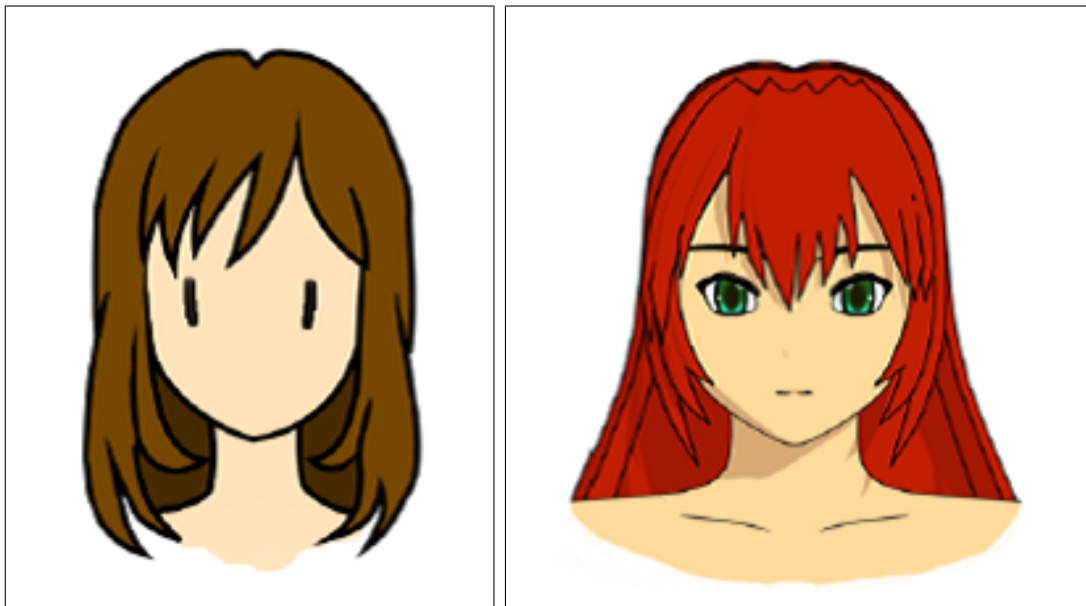


図 1.1: トゥーン調の髪の例

次にトゥーン調の髪の動きの特徴について説明する。作画アニメにおいて髪の毛が頭部の動作の影響を受けた時、また風などの影響を受けた時に髪の毛に動きが付く。そのとき髪の毛が揺れ動くと共に1本の髪の束が複数本の束に分裂する。その後動作が収まるにつれて裂けた髪の束が再びまとまり、元の1つの髪の形状となる。つまり髪全体がまとめて揺れるだけでなく、髪の束が動きに合わせて

複数本に分裂・集束して動いている。このような動作において大局的な全体の髪の形状は損なわずに、シーンにより異なる太さに枝分かれしているのがみられる。作画アニメにおける髪が動いている様子の一例を図1.2に示す。

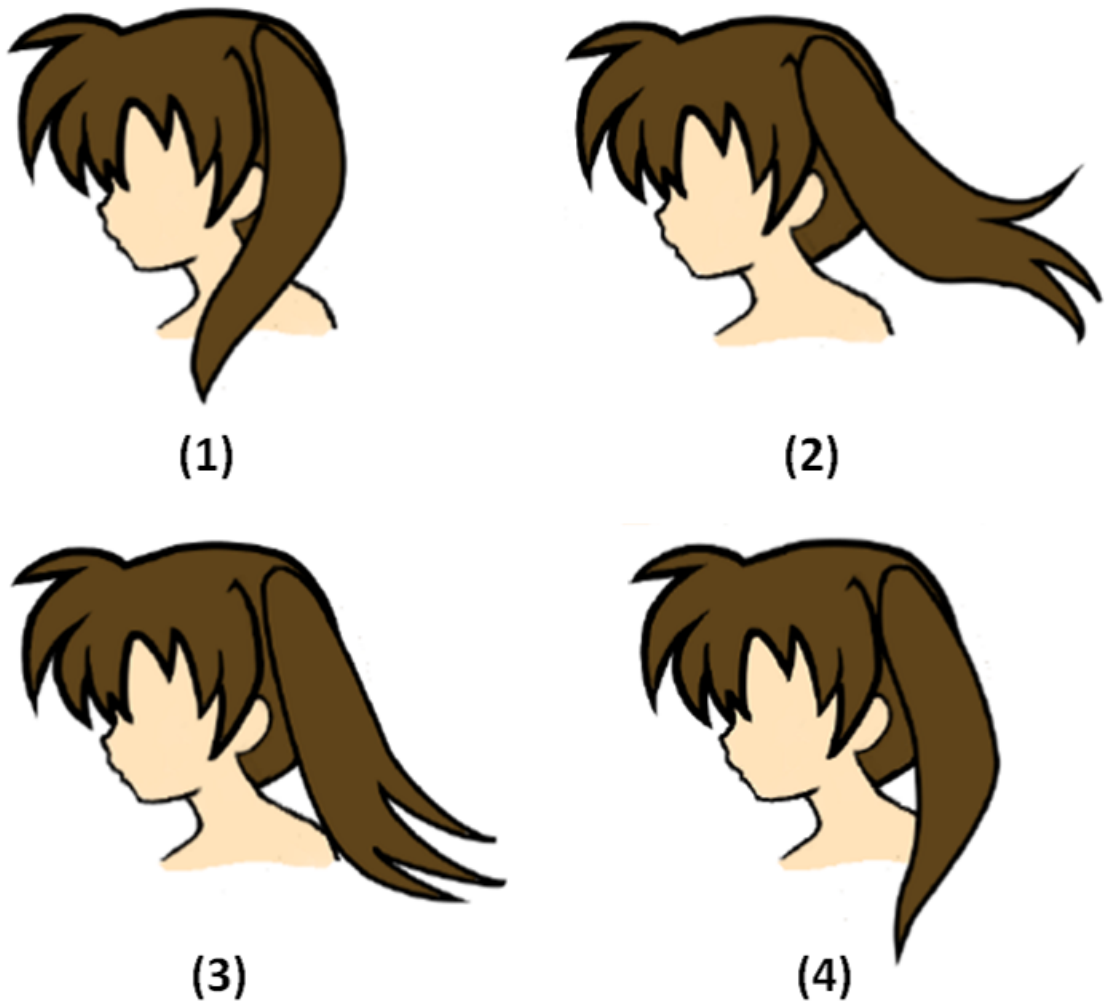


図1.2: 作画アニメにおける髪の動き

図1.2は(1)(2)(3)(4)の順でアニメーションしているものである。このように、作画アニメでは髪が塊に見えないように束が枝分かれを伴う形状変化をしながら髪の動きが付いている。この策がアニメの髪の動きに対してトゥーン調3DCGの髪の動きでは、髪の束の枝分かれを伴う動きを実現している例は非常に少なく、髪の3D形状を塊として作成し、キャラクターの動きに合わせてその髪の3D形状全体

を揺らすだけという表現が多い。そのため束になった髪が塊に見えてしまい、作画アニメ特有の髪の表現は考慮されていない。

3DCG アニメーション制作において 3D 形状に動きを付けるとき、多くの場合 3D 形状にボーンと呼ばれる制御軸を入れ、そのボーンと 3D 形状を対応付けることで変形などの動きを付ける [11]。髪においても同様にボーンを動かすことで髪の動きを付ける。このとき髪の枝分かれが変化するような頂点の増減が伴う形状変形は行えない。髪の 3D 形状に対して束の枝分かれの変化を含む動作を付ける場合、次の 2 つの方法が考えられる。第 1 にアルファ値を含む画像をポリゴンにテクスチャマッピングする手法がある。テクスチャマッピングを行う画像にアルファ値を設定することで、透明が混在した画像を生成することが出来る。このテクスチャマッピングしたアルファ値を含む画像自体をアニメーションすることで、3DCG においても束の枝分かれのようなアニメーションを付けることは可能となる。しかしこの手法では画像をアニメーションさせるコマ分だけ描く必要がある。またこの手法では単一視点からのテクスチャアニメーションになってしまうため、カメラの変化に対応できない。第 2 にそれぞれの髪の束の枝分かれが異なる 3D 形状を作成し、シーンや場面に応じて形状を切り替え、作成した 3D 形状でアニメーションを行う方法がある。この手法では髪の束の枝分かれが変化する数だけ異なる 3D 形状を作成する必要がある、作成した髪の枝分かれ形状でしか動きを付けることが出来ない。シーンによって異なる太さの束を持つ形状に切り替えたい場合、髪の束をデザイナーが希望通り作る作業がある。その際に全体の髪の太さを考慮しながらそれぞれの束の太さを調整するため実用的とはいえない。また動きを付ける際にそれぞれの髪の束にスキニング処理が必要になるが、入れ替える髪の 3D 形状の数だけ、それぞれにスキニング処理を行う。その後それぞれの髪の 3D 形状ごとに動きを付けなければならない。実際にモデルを作る手間とアニメーションのための手間、それぞれが切り替える数だけ必要であり、その場面限りでしか使えず、非常に手間がかかる。このようにトゥーン調 3DCG において髪の枝分かれが変化する形状を作成することは困難である。

3DCGにおける頭髪表現に関する研究は数多く行われており、頭髪形状と頭髪の運動表現に関するものが存在する。3DCGにおける頭髪表現では髪の毛を1本1本表現することは、見栄え、動きのどちらにしても実用的に難しく、擬似的な簡略化が必要となる。一般的に頭髪形状を表現する手法として3種類の手法が考えられる。頭髪形状全体を作成し、頭髪の表面をテクスチャとしてとらえ異方性反射 [12] やテクセル [13] 等で表現する方法と、頭髪1本1本を三角柱プリミティブ等の形状モデルを用いてモデル化する手法 [14]、そして前述した2つの手法を合わせた頭髪の形状をある一定のまとまりごとに髪束の形状モデルを作成して表現する手法がある。

テクスチャによる頭髪表現では、テクスチャにより質の高い画像を作成することが可能であるが、頭髪を一つの物体として扱うため、運動等の表現には適していない。この方法では前章で述べたように、形状が塊に見えてしまい、作画アニメ特有の表現は考慮されていない。テクスチャによる頭髪表現の例を図 1.3 に示す。



図 1.3: テクスチャによる頭髪の場合

次に頭髪1本1本の形状モデルでの表現はプロシージャルアニメーションなどの運動表現には適しているが、複雑かつ多量の頭髪を多角形ポリゴンでモデル化すると、計算量も増えてしまう。また細かい動きをつける場合、頭髪1本1本を制御する必要があり、非常に手間がかかってしまう。形状モデルを用いてモデル化したものを図1.4に示す。

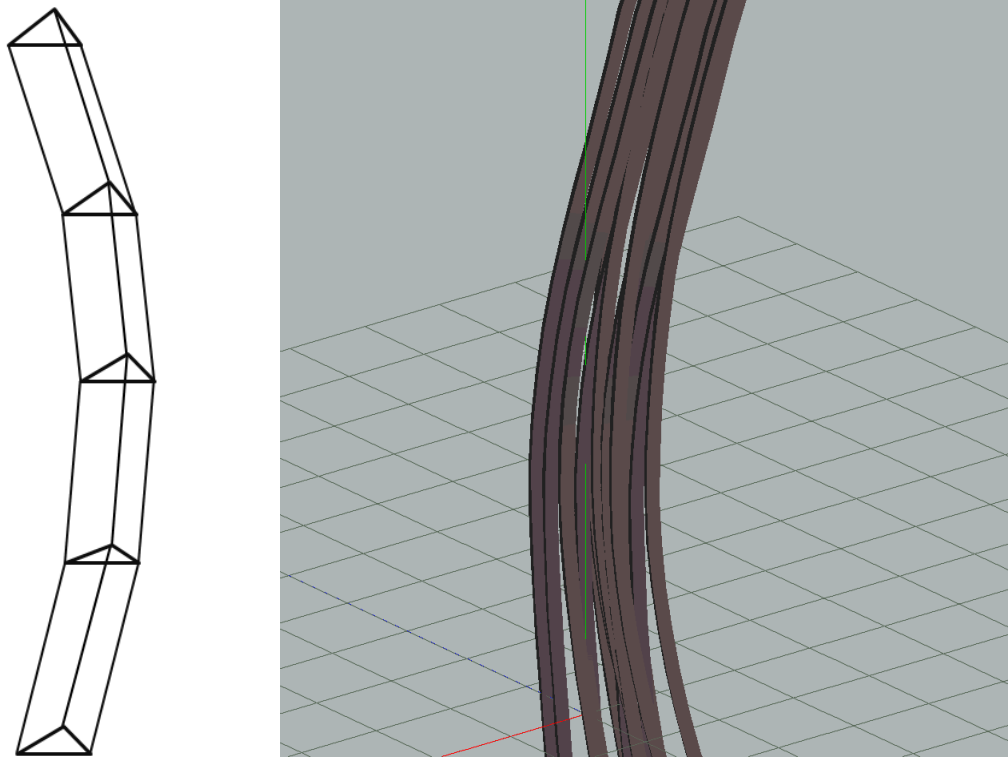


図 1.4: 形状モデルによる頭髪の例

そして頭髪の形状をある一定のまとまりごとに髪束の形状モデルで表現する手法は厚みを持たない短冊状の形状モデルを複数用いて重ね合わせる方法や、髪束を1つの塊状の簡易的なモデルとして用いる方法がある。どちらも形状の表面にテクスチャを描くことで質の高い画像を作成することが可能であり、頭髪を一定のまとまりごとに表現するため、ある程度の運動の表現を行うことも可能である。また頭髪1本1本を形状モデルで表現するよりもアニメーション等の運動制御における効率化を図ることも可能である。一定のまとまりごとに髪束の形状モデルで表現した頭髪の例を図 1.5 に示す。

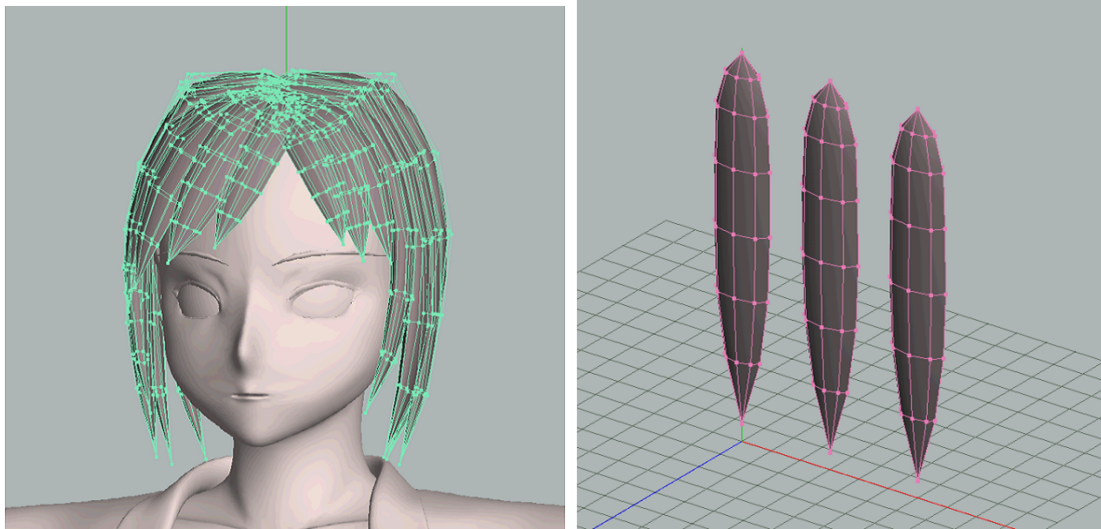


図 1.5: 一定のポリゴンによる頭髪の例

運動表現として既存の 3DCG アニメーション手法にキーフレームアニメーション [15][16] とサンプリングアニメーション、プロシージャルアニメーションがある。頭髪の運動表現も同様にこれらの手法を基に様々な研究がおこなわれている。

キーフレームアニメーションとは、フレームごとに位置や形状が変化するオブジェクトの情報を任意のキーとなるフレームにだけ登録しアニメーションを表現する手法である。キーフレーム間における位置や形状は、ファンクションカーブというオブジェクトの状態変化をあらわす線を基にして、コンピュータが計算する。ファンクションカーブを編集することで、キーフレーム間の動きが変化し、オブジェクトの加速や減速を表現できる。

サンプリングアニメーションとは動きを数値化しコンピュータに取り込む技術である。リアルタイムで画面上の CG キャラクターを動かしたり、人体の動作や表情をアニメーションの素材として活用したり、運動生理学などの研究の場で人体の動作の解析に利用されるなど、さまざまな現場で応用されている。制作者が求める動きをサンプリングしても、必ずしも正確にそのデータが測定されているわけではなく、データを補正するという作業もしなければならない。サンプリングアニメーションに関する頭髪表現の研究として、絵コンテから物理シミュレー

ションを用いて動作を規定する手法 [18] や、既存のアニメーションからの頭髪運動を抽出して物理方程式ベースでキャラクタに適用する手法 [19] がある。これらの手法では絵コンテと既存のアニメーションからトゥーン調 3DCG の形状が相似なものを用いる。そのため作画アニメにおける枝分かれを伴う表現は行われていない。

プロシージャルアニメーションとは物理法則や数式などのパラメータを定義することによって、アニメーションを構成する技術である。キャラクタなどの動きを任意に生成するキーフレーム法に対して、物理法則や数式により動きを生成する。人体の頭髪に関する研究としてはフォトリアルな髪を表現するものが多い。フォトリアルな髪に関する研究の中で少数の髪の束モデルを用いてシミュレーションにより髪の毛の動きを計算する手法 [17] がある。この手法においては少数の髪の毛の周囲に複数の髪の毛を生成し、髪の束とすることで束を動的に動かすことが出来る。また髪の毛の運動速度に応じて、自然な形状になるように変形する。これにより髪の毛のばらつく自然な表現が可能となっている。しかしトゥーン調の髪を対象としておらず、ばらつくなどの自然な表現を対象としているためトゥーン調に見られるような変化後の髪の形状といったものは実現できない。

ここまで 3DCG における頭髪形状および頭髪の運動表現について述べた。3DCG において頭髪形状と頭髪の運動表現は密接な関係があり、目的の形状変形を行うため、適する頭髪形状の生成手法を用いる必要がある。テクスチャによる頭髪表現では、ボーンを用いることである程度の変形は可能であるが、形状を構成する頂点を移動するだけであり、枝分かれ等の分割するような運動表現には適するとは言いえない。頭髪 1 本 1 本の形状モデルでの表現では、扱う髪の情報が多くなり非常に手間がかかってしまう。またこの手法はフォトリアルな画像を生成するものも多く、トゥーン調表現に適するとは限らない。そこで頭髪の形状をある一定のまとまりごとにポリゴンで表現する手法だが、これは一定のまとまりごとに頭髪を表現するトゥーン調表現と相性がよく、運動表現においてもキーフレームアニメーションやサンプリングアニメーション、プロシージャルアニメーションそ

れぞれに対応することが可能である。そこで既存のサンプリングアニメーション、プロシージャルアニメーションにおいても考慮されていない作画アニメ調の枝分かれ表現が可能な房モデルを提案し、この枝分かれ表現をキーフレームアニメーションにおいて簡易な入力操作で髪束の枝分かれ形状を作成し、その形状を再編集することが出来れば、効率化が図れると考えた。それに基づきガイド線と断面形状で表した髪の房モデルを効率的かつインタラクティブな入力操作でデザイナーの希望通りに枝分かれした形状に変形できる手法を提案する。枝分かれを伴う変化には、掃引軸となるガイド線を使い、ガイド線に沿って断面形状を掃引体で表した。ガイド線上の任意の点から並列にガイド線を分割することで髪の大局的な形状を損なわずに髪の枝分かれ形状変形を行った。これにより枝分かれを伴う髪の形状変形を可能にした。提案手法をプログラム上で実装し、枝分かれを伴う髪の形状の変形操作に関して検証を行い、実際に作画アニメで行われた枝分かれを伴うモーションと本ツールで作成したモーションを比較し、提案手法の有用性を確認した。

1.2 論文構成

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、本研究で提案する髪の構造について説明するとともに動的な枝分かれ制御方法について述べる。第3章では、本研究で開発した髪束の変形を行うアプリケーションを用いて検証と考察を行う。第4章では本研究の成果と意義をまとめ、今後の展望を述べる。

第 2 章

提案手法

本章では、本研究で提案する 3DCG におけるトゥーン調の髪束の枝分かれを伴う形状変形手法について述べる。髪の枝分かれを伴う形状変形では、ユーザが容易に形状変形の操作を行うと共に、視点の変化に対応した表現を目的とする。2.1 節では提案する髪モデルの構造について、2.2 節では断面図と立体図の双方向操作について、2.3 節では髪束形状の補間手法について述べる。なお本章では座標系は右手座標系を前提とする。

2.1 提案髪モデルの構造

本節では 3DCG におけるトゥーン調の髪の束の枝分かれを伴う形状変形手法について述べる。2.1.1 項では髪束の基礎形状を構成するガイド線と基礎形状生成手法について、2.1.2 項では髪束の枝分かれの構造について、2.1.3 項では髪束のメッシュ構成について述べる。

2.1.1 基礎形状のガイド線と基礎形状生成

枝分かれを伴う髪の束の形状変形を行うため髪を中心を表すガイド線と断面形状を用いる。このガイド線を掃引軸として断面形状を元に掃引体として髪の基礎形状を構成する。髪のガイド線の生成には、B-Spline 曲線 [21] と副軸 [22] を用いた。B-Spline 曲線は局所的な変形が可能であり、髪の動作に適すると考える。髪の基礎形状のガイド線となる B-Spline 曲線の媒介変数を $t(0 \leq t \leq 1)$ とし、制御点を 4 つ設ける。副軸は B-Spline 曲線を構成する各制御点の持つローカル座標系を示し、副軸の示す座標軸を副軸ベクトルと呼ぶ。副軸ベクトルの向きを利用することで、ガイド線の各媒介変数位置におけるローカル座標系の向きを自由に変えることが可能となる。図 2.1 はガイド線の構成である。曲線上の点を $\mathbf{M}(t)$ とし、 $\mathbf{M}(t)$ におけるローカル座標系を $\sum(\mathbf{M}(t); \mathbf{e}_x(t), \mathbf{e}_y(t), \mathbf{e}_z(t))$ とする。各座標軸系を表すベクトル $\mathbf{e}_x(t)$ 、 $\mathbf{e}_y(t)$ 、 $\mathbf{e}_z(t)$ は座標ベクトルとする。点 $\mathbf{M}(t)$ における $\mathbf{e}_y(t)$ を点 $\mathbf{M}(t)$ の接線ベクトルとし、 $\mathbf{e}_z(t)$ は副軸ベクトルを $\mathbf{d}_k(k = 0, 1, \dots, c - 1, c$ は曲

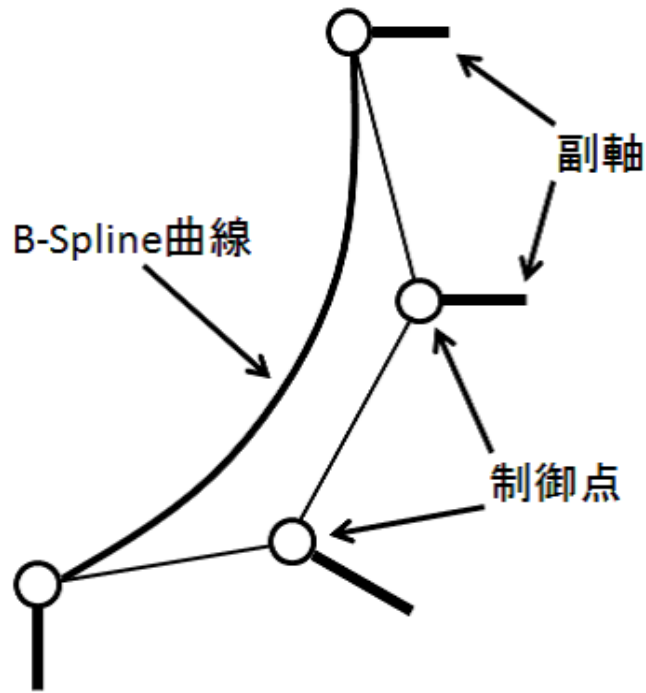


図 2.1: ガイド線の構成

線制御点の数) とし式 (2.1) を用いて求める。このとき $N_{k,n}(t)$ は B-Spline 基底関数である。

$$\mathbf{e}_z(t) = \sum_{k=0}^n N_{k,n}(t) \mathbf{d}_k \quad (2.1)$$

また点 $\mathbf{M}(t)$ における $\mathbf{e}_x(t)$ は $\mathbf{e}_y(t)$ と $\mathbf{e}_z(t)$ の外積となり、式 (2.2) から求める。式
中における \times は外積を表す。

$$\mathbf{e}_x(t) = \mathbf{e}_y(t) \times \mathbf{e}_z(t) \quad (2.2)$$

これにより曲線の媒介変数 t が任意の値をとった際のローカル座標系を規定した。

次に髪の基本形状を生成する。髪の基本形状を構成する際に断面形状には、 $D(D = 2n > 3)$ 角形状を用いた。楕円上に D 角形状を配置することで断面形状を定めた。この楕円の長軸の長さを a 、短軸の長さを $b(a \leq b)$ とした。 $\mathbf{M}(0)$ におけるローカル座標系 $\sum(\mathbf{M}(0); \mathbf{e}_x(0), \mathbf{e}_y(0), \mathbf{e}_z(0))$ の長軸方向を $\mathbf{e}_x(0)$ 、短軸方向を $\mathbf{e}_z(0)$ とし、 D 角形の頂点の位置ベクトルを求めた。 $\mathbf{M}(0)$ のローカル座標系における各頂点の

位置ベクトル $\mathbf{P}_i (i = 0, 1, \dots, M - 1)$ は式 (2.3) となる。

$$\mathbf{P}_i = \left(a \cos \frac{2\pi i}{M}, 0, b \sin \frac{2\pi i}{M} \right) \quad (2.3)$$

ガイド線を掃引軸として $\mathbf{M}(0)$ における断面形状をガイド線の接線方向に掃引することで基礎形状を生成していく。基礎形状の分割数を $p (p > 0)$ とし、ガイド線上を等間隔に分割する。分割したガイド線上の $t = \frac{h}{p} (h = 0, 1, \dots, p)$ の位置ベクトルを \mathbf{H}_h とし、断面形状を配置した。このとき断面形状の各頂点の位置ベクトルを $\mathbf{P}_{i,h}$ とする。 \mathbf{H}_h のローカル座標系における $\mathbf{P}_{i,h}$ は式 (2.3) と同様である。これにより D 角柱の掃引体が生成可能であるが、アニメ調の髪の形状では髪の先端に行くにつれ太さが細くなるものが多い。この特徴を考慮して、 D 角柱の毛先部分の太さを変更する必要がある。図 2.2 は生成した掃引体を実線で表し、理想とする特徴を考慮した髪の形状を破線で表したものである。毛先部分の太さを細くする

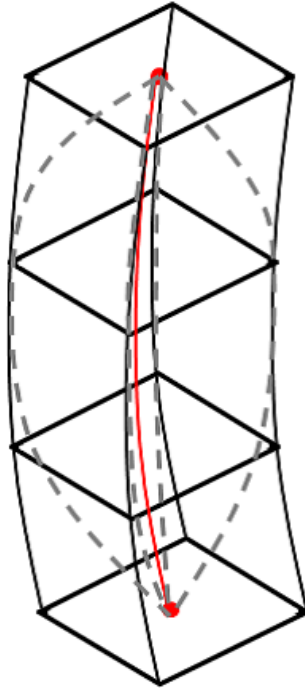


図 2.2: 生成した掃引体と目標とする形状

ためガイド線上の任意の位置における媒介変数を $m (0 \leq m \leq 1)$ とし、この m からガイド線の両端点に向けて徐々に太さを収束させる。 w を断面形状に加える倍

率とし、 \mathbf{H}_h に配置した断面形状の頂点 $\mathbf{P}_{i,h}$ を倍率 w により変更した。変更後の $\mathbf{P}_{i,h}$ は式 (2.4) となる。

$$\mathbf{P}_{i,h} = w\mathbf{P}_i \quad (2.4)$$

倍率 w は m 、 p 、 h と指数 v から求める。このとき指数 v ($0 \leq v \leq 1$) を任意の値とした。指数 v を変更することでどのように細くなるかが変更可能となる。 \mathbf{H}_h における断面形状の太さの倍率 w は式 (2.5) で求める。

$$w = \begin{cases} \left(\frac{\frac{h}{p}}{m}\right)^v & (0 \leq \frac{h}{p} \leq m) \\ \left(\frac{1 - \frac{h}{p}}{1 - m}\right)^v & (m < \frac{h}{p} \leq 1) \end{cases} \quad (2.5)$$

\mathbf{H}_h における w の倍率で変更した断面形状の頂点からメッシュを構成することで髪の毛の基礎となる形状を生成する。図 2.3 左は $m = 0.0$ 、図 2.3 右は $m = 0.4$ として基礎形状を生成したものである。

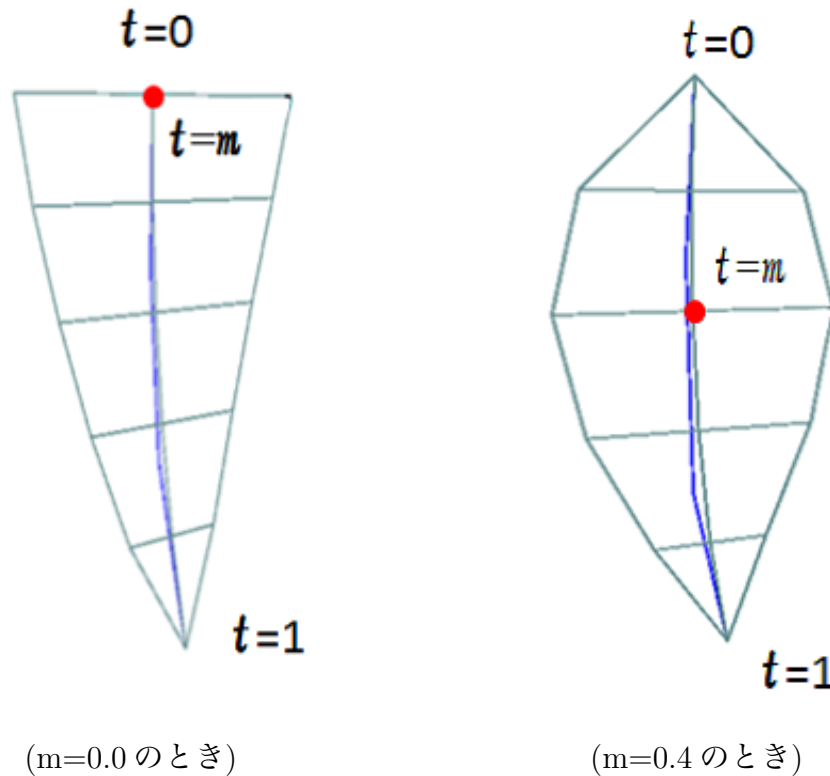


図 2.3: 基礎形状の例

2.1.2 髪の枝分かれ構造

基礎形状に対し、髪の子分かれを定義する。作画アニメにおいて髪の子分かれの变化を伴うアニメーションでは髪の大局的な太さの变化はあまりみられない。それに基づき本手法では、枝分かれ变化前の髪の子分かれを保持し、枝分かれ变化後の髪の子分かれの太さの合計と等しくした。本手法では、ガイド線上の子分かれが起きる位置を起点位置と呼称し、起点位置におけるローカル座標系での $\mathbf{e}_x(t)$ 方向に軸を設定する。この軸を枝分かれ軸と呼称する。枝分かれ軸は、視点变化に対応するため、起点位置の接線方向 $\mathbf{e}_y(t)$ を軸として、回転角度 $\beta(0 \leq \beta \leq 2\pi)$ により回転することが可能である。枝分かれ分割後の新たに生成するガイド線の制御点を枝分かれ軸方向に平行に移動し、枝分かれの本数分ガイド線を生成することで枝分かれの变化を行う。ガイド線の媒介変数 t の条件を満たす $u(0 \leq u < 1)$ を定め、 u におけるガイド線の位置ベクトルを $\mathbf{M}(u)$ とし、これを起点位置とした。この起点位置に断面形状を配置し、断面形状を2分割する直線を定める。この直線と断面形状の辺の交点を求める。 $\mathbf{M}(u)$ を通る直線の方角ベクトルを \mathbf{L} とした。 $\mathbf{M}(u)$ のローカル座標系における \mathbf{L} は式 (2.6) とする。

$$\mathbf{L} = (\cos \beta, 0, \sin \beta) \quad (2.6)$$

$\mathbf{M}(u)$ のローカル座標系において式 (2.6) で求めた \mathbf{L} と断面形状の辺の線分から交点計算を行う。起点位置 $\mathbf{M}(u)$ における断面形状の辺の各頂点は $\mathbf{P}_{i,u}$ となり、 \mathbf{L} と交差する辺の端点を \mathbf{A} 、 \mathbf{B} とした。 \mathbf{A} は式 (2.7)、 \mathbf{B} は式 (2.8) で求める。

$$\mathbf{A} = \mathbf{P}_{i,u} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{cases} \mathbf{P}_{i+1,u} & (i < M - 1) \\ \mathbf{P}_{0,u} & (i = M - 1) \end{cases} \quad (2.8)$$

\mathbf{A} を始点、 \mathbf{A} から交点までの比率 s としたとき、交点を \mathbf{Q}_0 、 \mathbf{Q}_1 とし、 \mathbf{Q}_0 は式 (2.9) となり、断面形状は $M(M = 2n > 3)$ 角形状であるため、交点 \mathbf{Q}_1 は式 (2.9) の逆ベクトルであり式 (2.10) となる。

$$\mathbf{Q}_0 = \mathbf{A} + (\mathbf{B} - \mathbf{A})s \quad (2.9)$$

$$\mathbf{Q}_1 = -\{\mathbf{A} + (\mathbf{B} - \mathbf{A})s\} \quad (2.10)$$

s は、 \mathbf{A} から \mathbf{L} の距離と \mathbf{B} から \mathbf{L} の距離との比から求めることが可能である。よって s は式 (2.11) となる。式中の \times は外積を表す。

$$s = \frac{|\mathbf{L} \times \mathbf{A}|}{|\mathbf{L} \times \mathbf{A}| + |\mathbf{L} \times \mathbf{B}|} \quad (2.11)$$

この2頂点からなる直線を枝分かれの軸とする。この軸を基にして複数本に分割する分割後の新しいガイド線を生成していく。分割する房の本数を q とし、分割後の束の太さの合計を髪の毛の根元の太さと等しくするため、それぞれの房の太さの比率を $f_j (j = 0, 1, \dots, q-1)$ とする。このとき f_j は式 (2.12) を満たすものとする。

$$\sum_{j=0}^{q-1} f_j = 1 \quad (2.12)$$

式 (2.12) の条件式を満たす比率 f_j を用いて、分割した房のガイド線を生成する。分割した房のガイド線にも B-Spline 曲線を採用し、制御点を4つ設定する。基礎形状のガイド線の $(u \leq t \leq 1)$ の範囲において等間隔な4点の位置を基準とし、この4点の位置を枝分かれ軸方向に移動したものを分割後のガイド線の制御点とした。基準となる基礎形状のガイド線の媒介変数 $t = u + \frac{g}{3}(1-u) (g = 0, 1, 2, 3)$ の位置ベクトルを \mathbf{T}_g とする。 \mathbf{T}_g におけるローカル座標系の $\mathbf{e}_x(g)$ 軸方向を \mathbf{U}_g とし、 \mathbf{U}_g の長さを1とする。 \mathbf{T}_g を \mathbf{U}_g 方向に平行移動することで分割後の房のガイド線の制御点の位置ベクトル $\mathbf{S}_{j,g}$ を求める。基準となる枝分かれ軸上の房のガイド線の制御点の位置 $\mathbf{S}_{j,0}$ は式 (2.13) となる。

$$\mathbf{S}_{j,0} = \begin{cases} \frac{2\mathbf{Q}_0 + (\mathbf{Q}_1 - \mathbf{Q}_0)f_0}{2} & (j = 0) \\ \frac{2\mathbf{Q}_0 + (\mathbf{Q}_1 - \mathbf{Q}_0)(f_{j-1} + f_j)}{2} & (j > 0) \end{cases} \quad (2.13)$$

位置 $\mathbf{S}_{j,0}$ を基準に $g = (1, 2, 3)$ のときの制御点の位置ベクトル $\mathbf{S}_{j,g}$ は式 (2.14) で表す。

$$\mathbf{S}_{j,g} = \mathbf{T}_g + \mathbf{U}_g | \mathbf{S}_{j,0} - \mathbf{T}_0 | \quad (2.14)$$

この制御点の位置 $\mathbf{S}_{j,g}$ を枝分かれ後の初期位置とする。

また房の太さの比率 f_j は任意に変更することが可能である。図 2.6 は髪の基本形状から、房の本数を $q = 2$ として生成した制御点の位置とガイド線である。

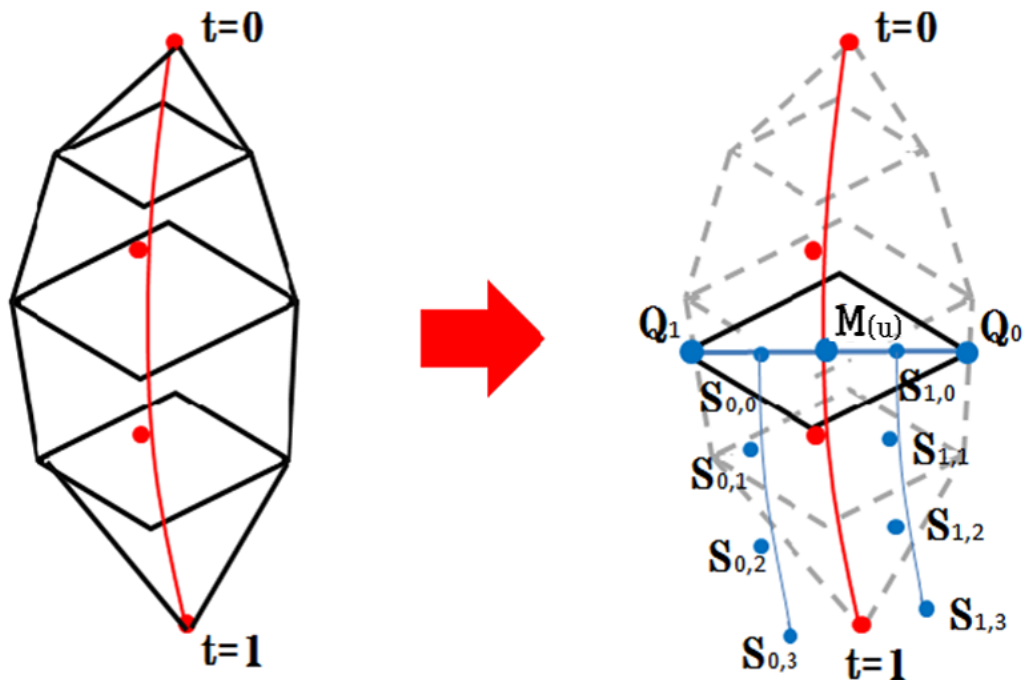


図 2.4: $M(u)$ における制御点とガイド線

2.1.3 髪のマッシュ構成

前項で分割した房のガイドから形状を生成する。変数 u におけるガイド線の位置ベクトル $M(u)$ を分割の起点として扱い、 $u = 1$ のとき基礎形状となり、 $0 \leq u < 1$ のとき枝分かれを伴う形状の変形が起こる。 u によりガイドを分割する際に $0 \leq t \leq u$ の範囲のマッシュを変形する必要がある。そこで基礎形状を構成した位置ベクトル

ル \mathbf{H}_h を u によって変動するようにし、 \mathbf{H}_h の位置を定める媒介変数 t を式 (2.15) から求める。

$$t = \frac{h}{p}u \quad (h = 0, 1, \dots, p) \quad (2.15)$$

これにより基礎形状のガイドの媒介変数 $t(0 \leq t \leq u)$ の範囲において断面形状を等分割に再配置することが可能となる。このとき新たに生成した房のガイド線において基礎形状と同様に断面形状とガイド線を用いて形状を構成する。枝分かれ分割後の房の形状を構成するため、房のガイドから分割数を r とし、ガイド線上を等間隔に断面形状を配置する。分割後に生成したガイド線の媒介変数を n とし、 $n = \frac{l}{r}(l = 0, 1, \dots, r)$ の位置ベクトルを $\mathbf{R}_{n,j}$ として断面形状を配置した。 $\mathbf{R}_{n,j}$ における断面を構成する長軸 a と短軸 b の大きさを変更することで、髪の毛の形状を生成する。 $\mathbf{R}_{n,j}$ における $\mathbf{e}_x(n)$ 方向の長さを W_x とし、 W_x は式 (2.16) で求める。

$$W_x = \begin{cases} a \left(\frac{\frac{h}{p}}{m} \right)^v f_j & (0 \leq \frac{h}{p} \leq m) \\ a \left(\frac{1 - \frac{h}{p}}{1 - m} \right)^v f_j & (m < \frac{h}{p} \leq 1) \end{cases} \quad (2.16)$$

同様に $\mathbf{R}_{n,j}$ における $\mathbf{e}_z(n)$ 方向の長さは \mathbf{M}_u の位置において枝分かれ軸と直行する直線と断面形状の頂点を結ぶ直線の辺との交点を \mathbf{V} とし、 \mathbf{V} と \mathbf{M}_u の長さを基準とする。この長さを A とした。 A を基にして $\mathbf{R}_{n,j}$ における $\mathbf{e}_z(n)$ 方向の長さ W_z を式 (2.17) で求める。

$$W_z = \begin{cases} A \left(\frac{\frac{h}{p}}{m} \right)^v & (0 \leq \frac{h}{p} \leq m) \\ A \left(\frac{1 - \frac{h}{p}}{1 - m} \right)^v & (\frac{h}{p} < m \leq 1) \end{cases} \quad (2.17)$$

求めた両軸の長さから断面形状を生成する。この断面形状の各頂点からメッシュを構成する。基礎形状のガイド線の $\mathbf{M}(u)$ の接合部において再配置した形状の断面の各頂点と生成したガイドの断面の各頂点が混在する。この状態でメッシュを構成すると起点位置 $\mathbf{M}(u)$ において歪んだ形状になってしまう。このときの形状を図 2.5 に示す。

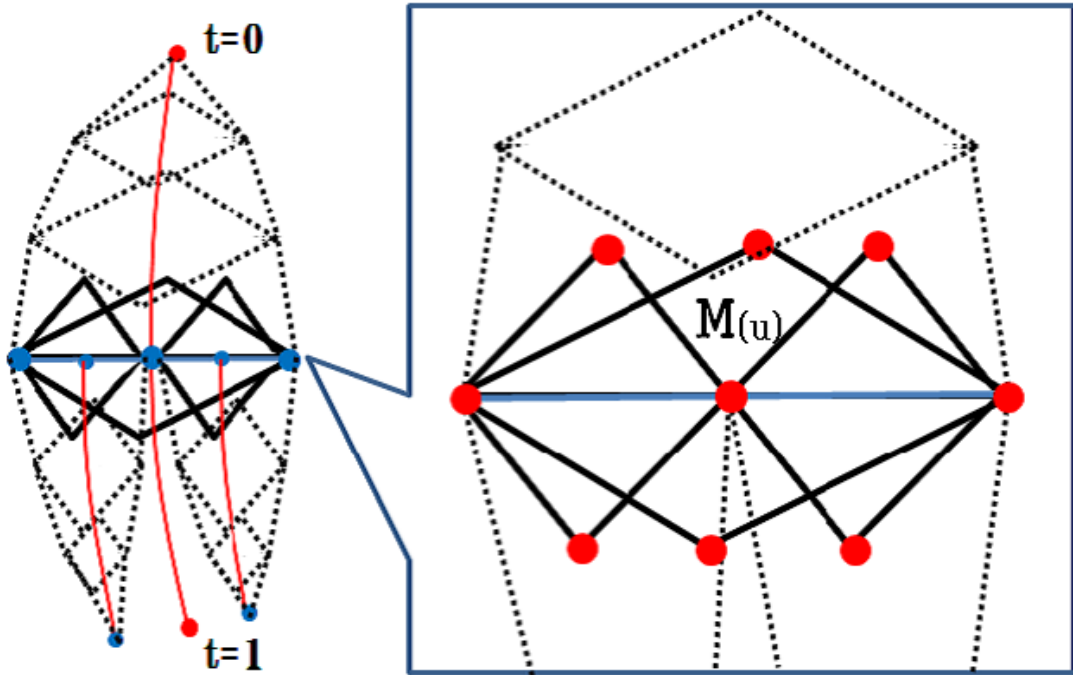


図 2.5: $M(u)$ における頂点の配置

この形状を解消するためメッシュを連続的につなぐ必要がある。そこで H_p におけるローカル座標系に再配置した頂点を除去し、その後 q 本の房において H_p のローカル座標系に再配置した頂点と房の頂点から形状を構成する。図 2.6 は $q = 2$ とし、 $f_0 = 0.5$ 、 $f_1 = 0.5$ の比率で分割したものである。

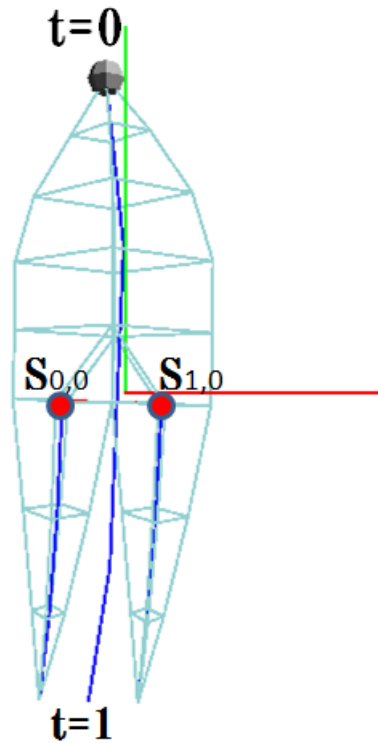


図 2.6: 形状分割の例

これにより髪形状を構成した。

2.2 断面図と立体図の双方向操作

効率的な編集を行うため本研究では断面図への操作により分割数と分割比率の追加、変更を行い、立体図への操作により分割の起点位置の変更を行う。入力として、数値による入力操作とピックによる入力操作を実現した。本節における変数名は 2.1 節で述べたものである。数値による入力では「分割する髪の本数」 q 、「分割の起点」 u 、「分割した房の比率」 f_j 、「枝分かれ軸角度」 β をそれぞれ指定することで入力を行う。しかしこれではユーザがあまり直感的に操作を行うことができない。そこでカーソルを入力点としてマウスボタンのクリックとドラッグによる入力操作を行う。 q 、 f_j の操作は断面図において行う。断面図のウィンドウ座標における髪形状領域において、枝分かれ軸上に q 、 f_j の追加・編集・消去

の操作を行う。同様に u 、 β の操作は立体図において行う。立体図のウィンドウ座標における髪の形状領域において、 u の位置を操作し、 β を回転操作することで入力を行う。これによりユーザの入力操作を実現した。断面図と立体図による編集図を図 2.7 に示す。

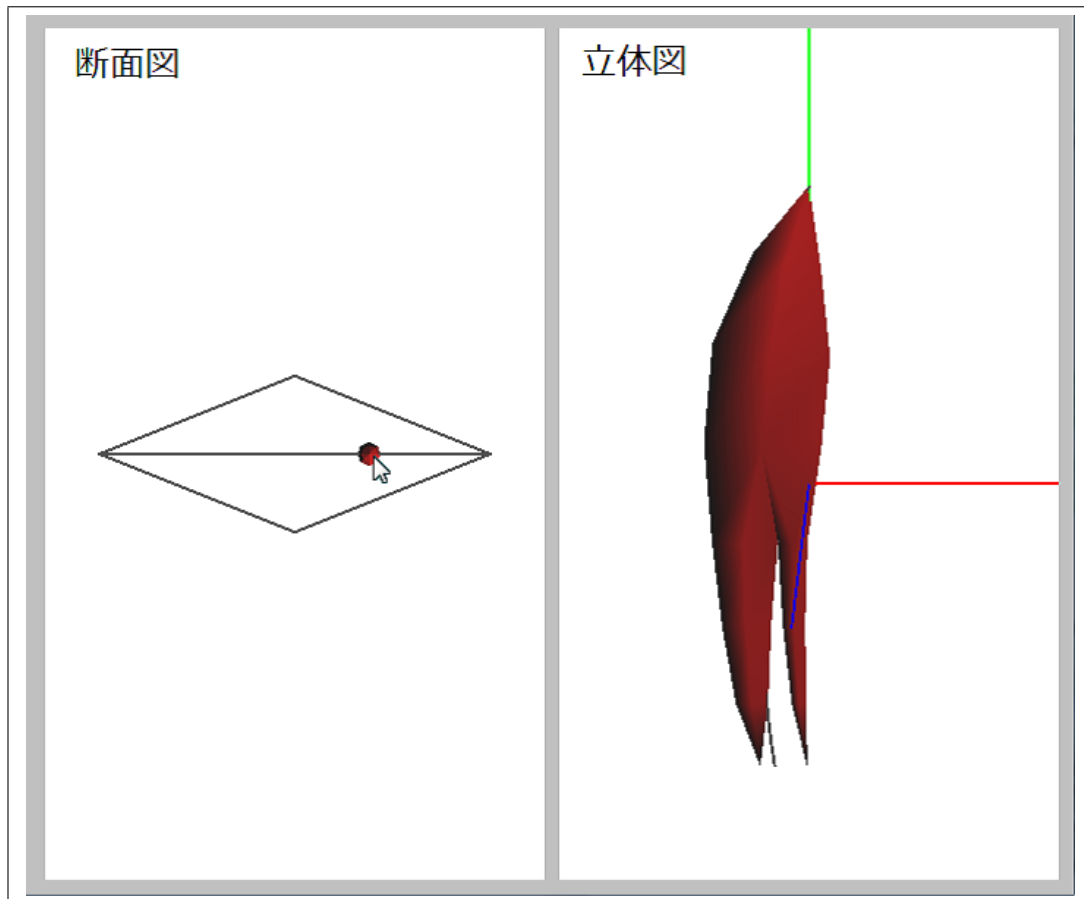


図 2.7: 枝分かれの編集図

2.3 枝分かれ形状の補間手法

前節までガイド線を用いたトゥーン調の髪束の枝分かれの形状変形手法について述べた。本手法では変形した髪の形状をキーフレーム補間することでアニメーションを実現する。キーフレームの補間手法として線形補間を用いる。本節における変数名は 2.1 節で述べたものである。基礎形状に「分割する髪の房の本数」 q を設定することで、その本数分での形状変形を行う。その際に枝分かれの形状変

形に用いた分割の起点 u 、分割した房の比率 f_j 、枝分かれ軸の角度 β とこれらのパラメータを操作して髪の子分かれの初期形状における生成した房のガイド線の曲線制御点をそれぞれ線形補間することでキーフレームアニメーションを実現した。

第 3 章

評価と検証

本章では、本研究で提案した枝分かれ手法に沿って実装したプログラムを使用し、その有用性を検証する。本手法を検証するために使用した環境を表3.1に示す。以上の環境下において、髪束先の形状変形操作による結果を生成し検証を行った。

表 3.1: 実行環境

OS	Windows 7 Enterprise
CPU	AMD Phenom(tm) II X4 945 Processor 3.00 GHz
RAM	4GB
GPU	NVIDIA GeForce GTX 260

処理速度の単位はFPS(Frame Per Second)であり、1秒間に可能な描画処理の回数を表す。枝分かれ表現のプログラムは、グラフィクスAPIであるOpenGL[23]、及びOpenGLを基にした3DCGツールキットであるFK ToolKit System[24][25]を使用し、シェーダプログラミングにはNVIDIA社のCG言語[26]を用いて実装した。なお本章における変数名は2章の変数を示す。

3.1 操作手順

基礎形状生成手順として、まず断面形状のパラメータ a 、 b 、 M を設定し、基準となる断面形状を生成する。その後、制御点を4点を入力しガイド線を生成する。ガイド線の媒介変数 $t = 0$ において配置する断面形状の方向ベクトルを任意の値とする。基礎形状の太さを定めるため、最大となる m を入力し、髪の基礎形状を構成する。

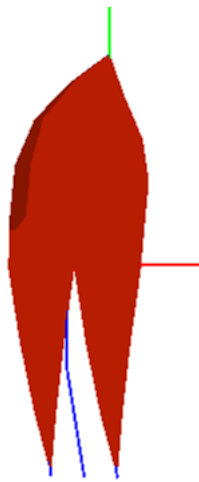
髪束先形状変形手順として、断面図において枝分かれの房の本数 j を入力する。同様に、断面図上で房の比率 p_i を入力する。立体図上で枝分かれの起点位置 u と枝分かれ軸角度 β を入力する。これらの操作により枝分かれ変形を行う。

3.2 実行結果

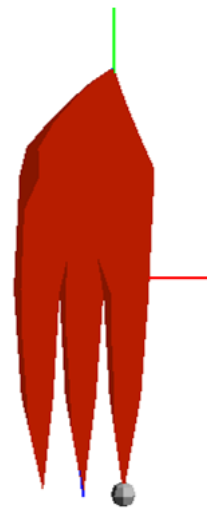
枝分かれを伴う分割操作では、「分割する髪の本数」、「分割の起点」、「分割した髪の比率」を入力操作することで容易に枝分かれを伴う変形が可能となった。数値入力による操作の内容、操作して生成した髪モデルを図 3.1 に示す。図 3.1 は枝分かれ軸角度 $\beta = 0$ の状態である。



(a) 基礎形状



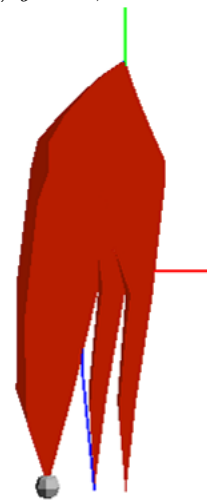
(b-1) $j = 2, u = 0.5$



(c-1) $j = 3, u = 0.5$



(b-2) $p_0 = 0.8, p_1 = 0.2$

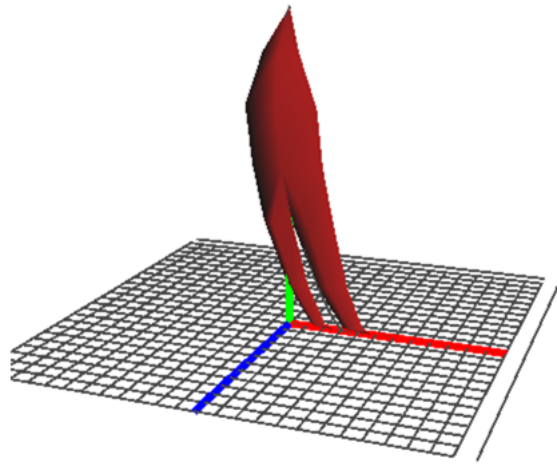


(c-2) $p_0 = 0.6, p_1 = 0.2, p_2 = 0.2$

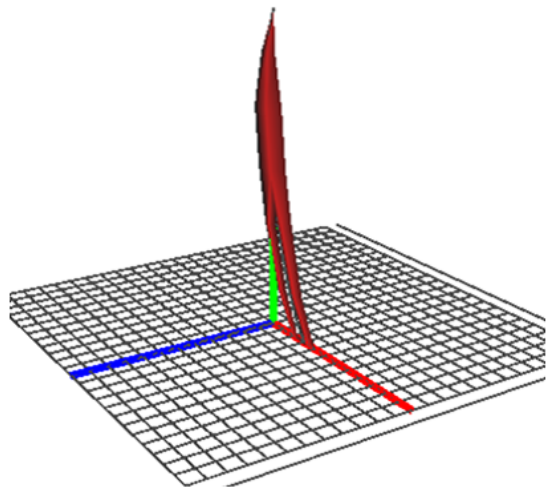
图 3.1: 実験結果 1

図 3.1 の (a) は髪束の基礎形状である。この基礎形状に分割の本数 j を入力し、枝分かれの基点位置 u を操作した形状が図 3.1(b-1)、(c-1) となる。そして分割した房の比率操作を行ったものが図 3.1(b-2)、(c-2) となる。このように本手法を用いることで3つの単純な手順で異なる枝分かれ形状を生成することが可能である。これら3つの手順を行い形状変形を行った際の10秒間における平均処理速度は650FPSであった。

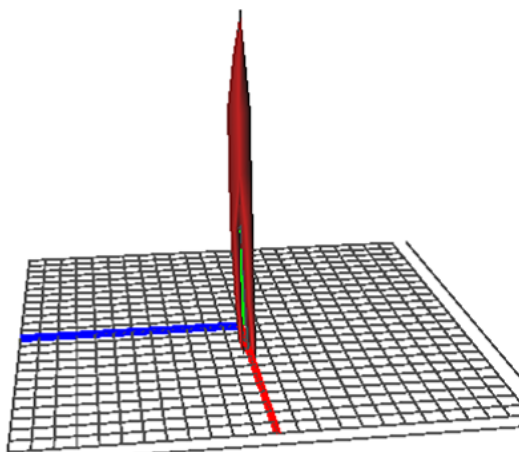
同様に、シーンや場面により視点の変化する髪の枝分かれ表現にも枝分かれ軸を回転操作することで対応し、基礎形状の髪束の構成領域内での視点の変化が可能となった。枝分かれ軸角度 β による操作の内容、操作して生成した髪のモデルを図 3.2 に示す。



(1) $\beta = 0$



(2) $\beta = \frac{\pi}{4}$

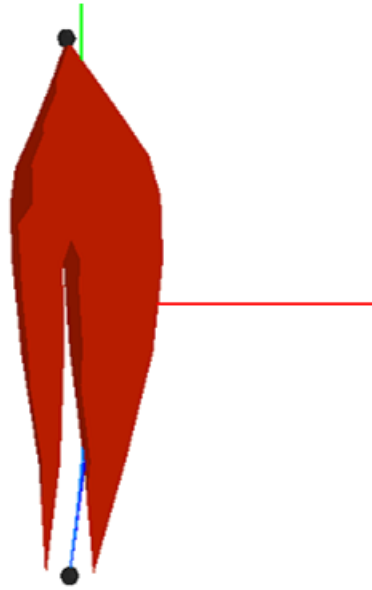


(3) $\beta = \frac{\pi}{2}$

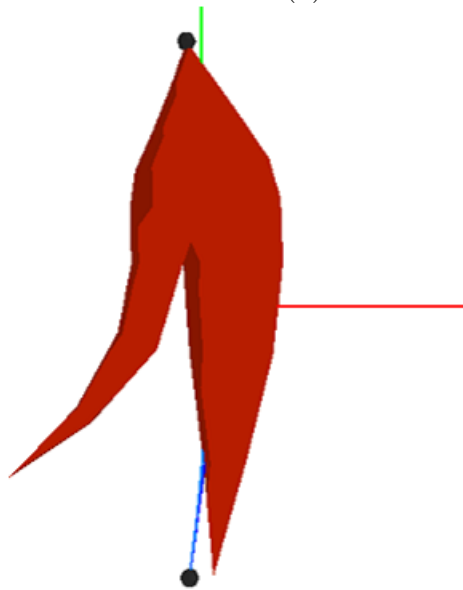
図 3.2: 実験結果 2

図 3.2 の (1) は髪束の基礎形状を操作して枝分かれ形状を生成したものである。生成した枝分かれ形状に対して、視点の回転を行い、枝分かれ軸角度 β を変化したものが、図 3.2(2)、(3) となる。このように本手法を用いることで視点の変化に対応した枝分かれ形状変形が可能となった。この枝分かれ軸角度 β の変化も図 3.1 の変形と同様に 10 秒間に平均処理速度は 650FPS であった。これにより十分なインタラクティブ性が確保できたといえる。

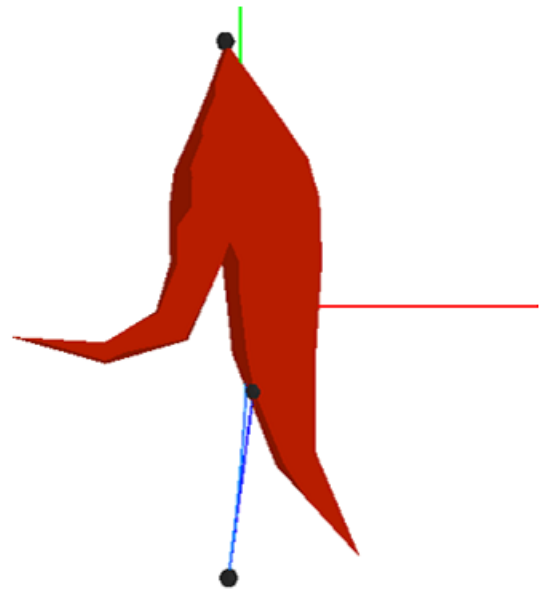
また枝分かれの房の本数 j と房の比率 p_i 、起点位置 u 、枝分かれ軸角度 β を操作後に、生成した房のガイド線の曲線制御点を操作することで細かい髪束の動作も行うことが可能である。図 3.1 と同様の操作後に髪束の枝分かれ形状生成後に房のガイド線の曲線制御点を操作したものを図 3.3 に示す。



(a) 曲線制御点の初期位置



(b-1) 曲線制御点の位置変更



(b-2) 曲線制御点の移動

図 3.3: 実験結果 3

図 3.3(a) は各パラメータ j 、 p_i 、 u 、 β を操作後の初期形状である。この初期形状から分割後新たに生成した房のガイド線の曲線制御点の位置を変更したものが、図 3.3(b-1)、(b-2) となる。

本手法を用いることで作画アニメ調の髪束先の枝分かれを伴う形状変形を容易に生成することが可能となった。そこで形状変形した髪の形状にキーフレームア

アニメーションを適用して有用性を検証する。図 1.2 に示した実際のアニメーションで用いられていた形状変形と本手法を用いて生成したアニメーションの結果を図 3.4 に示す。



(1)



(1)



(2)



(2)



(3)



(3)



(4)



(4)

作画アニメの髪

本手法の髪

図3.4: アニメーションの結果

基礎形状に房の本数、比率を設定しておき、基点位置 $u = 0$ の時にガイドの制御点を操作したものが図 3.4 の (1) となる。そして基点位置 u の値を増加し髪を分割していき、それぞれの房にも動作をつけたものが図 3.4(2)、(3) となり、基点位置を $u = 0$ に戻したものが図 3.4(4) となる。このとき u の値と、制御点の位置ベクトルを線形補間し、キーフレームアニメーションで実現した。また、本手法の房モデルを複数本用いてアニメーションした結果を図 3.5 に示す。図 3.5 は (1)(2)(3)(4)(5) の順でアニメーションしているものである。このように髪束を作成し、それぞれの髪の形状を任意に操作することで作画アニメ調の髪の変化を実現した。

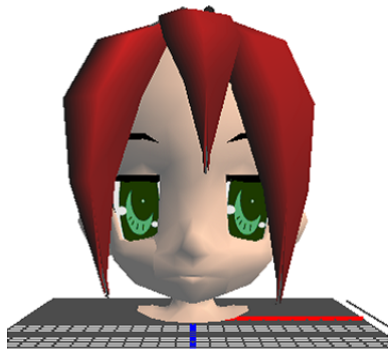
また作画アニメ調の枝分かれを伴う頭髪表現の検証として、本手法を適用したアニメーション応用例を作成し、その作品を基に検証を行った。本アニメーション応用例ではツテールの髪の房に本手法を適用し、枝分かれ表現の有用性を目視で確認した。検証に用いたアニメーション応用例を図 3.6 に示す。図 3.6 のキャラクタの動きに対して、本手法の房モデルを追従して動かしアニメーションを行った。アニメーション作品内において適用することが可能である。

これらの検証により房の分割の起点の操作や房の比率の変更が容易に行え、視点の変化に対応した髪の動きの形状変形を行えることを確認出来た。そして作画アニメ同様の枝分かれ表現の有用性を確認できた。よって本手法で 3DCG における作画アニメ調の髪の枝分かれ構造を定義するとともに髪の枝分かれを伴う形状変形表現が容易に行うことが可能であり効率的に頭髪を作成できることを確認した。また処理速度の面からみても 10 秒間に平均処理速度は 650FPS であり、十分なインタラクティブ性が確保できていると考える。

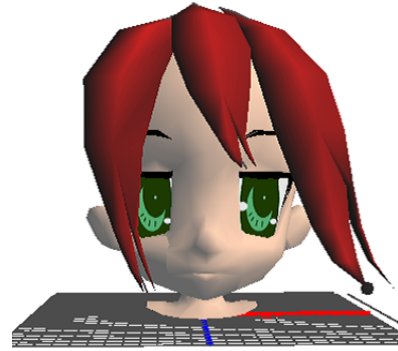
3.3 現状の問題点

本研究では作画アニメにおける頭髪の形状・動きに着目したため頭髪のテクスチャについて言及していない。従来研究からもあるように頭髪像の生成には髪の模様(テクスチャ)と髪の形状(髪型)の二つの要素があり、リアルタイムコンテンツなどではテクスチャによる頭髪がよく用いられている。本研究で提案した髪モ

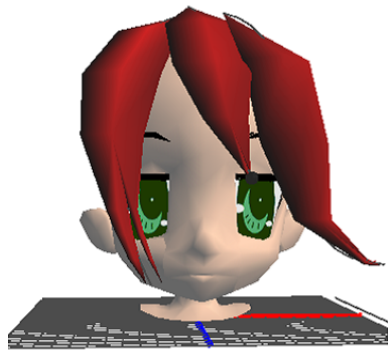
デルにも基礎形状を構成する際にテクスチャ画像を用いることで、髪の様を考慮することが可能であるとする。



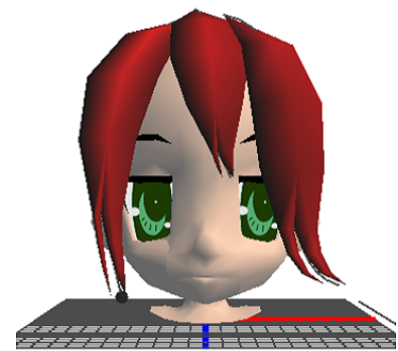
(1)



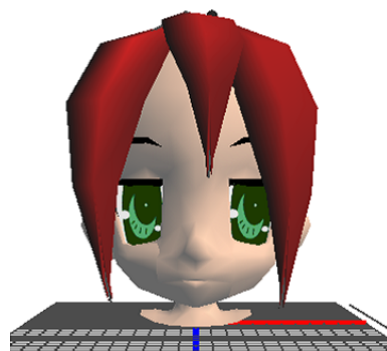
(2)



(3)



(4)



(5)

図 3.5: 複数の髪束によるアニメーション結果



図 3.6: アニメーション応用

第 4 章

おわりに

本稿ではトゥーン調 3DCG の髪に対し、髪束の基礎形状を、分割する髪の房の本数、分割の起点、分割した房の比率、枝分かれ軸角度の単純なパラメータ操作で、大局的な形状を損なわずに枝分かれの形状変形を行う手法を提案した。これにより単純なパラメータ操作で、作画アニメで行われていた髪の枝分かれ表現を効率的に実現できることを示し、これらのパラメータ操作をインタラクティブに入力することが可能となった。本研究の枝分かれ手法をツリー構造にすることで、房の本数が 3 本から 5 本、4 本から 2 本など異なる房の本数へとアニメーションすることが可能であると考え。またツリー構造を用いることで複数本に枝分かれした際に枝分かれの起点位置をそれぞれ変更することが可能であるため、さまざまな髪の表現が可能になると考える。

本研究は芸術科学会第 26 回 NICOGRAPH 論文コンテストにおいて“3DCG における作画アニメ調髪束先の形状変形手法” [27] として発表した内容を含む。

謝辭

本研究を締めくくるにあたり、足掛け3年間研究の指針及び開発の手法、論文の執筆と幅広いご指導ご教授を頂きました、主査である本校メディア学部の渡辺大地講師、並びに副査の三上浩司講師、近藤邦雄教授に厚く感謝いたします。また研究の方針とさせていただいた地神知哉さん、共に戦場を駆けつけた戦友たちに厚く感謝とともに、これから戦場に赴く人たちへ厚いエールを送ります。

参考文献

- [1] Philippe Decaudin, "Cartoon-Looking Rendering of 3D-Scenes" , IN-RIA,1996.
- [2] Amy Gooch, Bruce Gooch,Peter Shirley,Elaine Cohen, "A Non-Photorealistic Lighting Model For Automatic Technical Illustration" , SIGGRAPH 98, 1998.
- [3] Adam Lake, Carl Marshall, Mark Harris, Marc Blackstein, "Stylized Rendering Techniques For Scalable Real-Time 3D Animation" , NPAR'00,2000.
- [4] 近藤邦雄, 斉藤隆文, "Non-Photorealistic Rendering", 画像電子学会誌第 33 巻第 4-B 号, pp. 642-650, 2004.
- [5] 東京工科大学クリエイティブラボ, 「デジタルアニメマニュアル 2008」, 東京工科大学編, 2008.
- [6] 佐藤修一, 近藤邦雄, 佐藤尚, 島田静雄, 金子満, "アニメーション制作におけるキャラクターの動作強調手法 Motion Filter" , テレビジョン学会誌, Vol49, No.10, pp. 1280-1287, 1995.
- [7] 小林光弘, 近藤邦雄, "コンピュータアニメーションのための動作強調手法" , 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会, No.93-1, pp. 1-5, 1998.
- [8] 周宇, "従来型アニメーションの誇張表現の抽出と活用手法の研究" , 東京工科大学大学院, バイオ・情報メディア研究科, メディアサイエンス専攻, 2006.
- [9] 桑原明栄子, 牧野光則, "CG アニメーション用誇張表現作成補助システムの提案" , 芸術科学会論文誌 Vol.2,No.1, pp.21-30, 2006.
- [10] Aleka McAdams, Andrew Selle, Kelly Ward, Eftychios Sifakis, Joseph Teran, "Detail Preserving Continuum Simulation of Straight Hair" , SIGGRAPH,2009.

- [11] Thomas W. Sederberg, Scott R. Parry, "Free-Form Deformation of solid geometric models", Computer Graphics, Vol.20, No.4, Aug.1986.
- [12] 山名岳志, 末永康仁, "異方性反射モデルを用いた頭髪表現"信学技法, PRU 87-3, 1989.
- [13] J.T.Kajiya and T.L.Kay, "Rendering fur with three dimensional textures" Computer Graphics(Proc.SIGGRAPH 89), vol.23,no.3,pp.271-280,July 1989.
- [14] 渡部保日兎, 末永康仁, "三角柱と房モデルによる頭髪生成", 情報処理学会全大,5K-10, pp.715-716, 1986.
- [15] 「CGWORLDvol.32」, 骨と筋肉をまじめに考える 32-52, ワークスコーポレーション,2001.
- [16] 尾沢直志, 「アニメ作画の仕組み—キャラに命を吹き込もう!」, ワークスコーポレーション,2004.
- [17] Masaki Oshita, "Real-time Hair Simulation on GPU with a Dynamic Wisp Model", CASA 2007,2007.
- [18] Eiji Sugisaki, Yizhou Yu, Ken Anjyo, Shigeo Morishima, "Simulation-Based Cartoon Hair Animation", WSCG 2005,2005.
- [19] Eiji Sugisaki, Yosuke Kazama, Shigeo Morishima, Natsuko Tanaka, Akiko Sato, "Anime Hair Motion Design from Animation Database", CASA 2006,2006.
- [20] J.WEBER, J.PENN, "Creation and rendering of realistic trees", SIGGRAPH 95, 1995.
- [21] 日本設計工学会, 「3次元CAD実践活用法」,2.2.4節, コロナ社, 2006.

- [22] 山野上寛, 「制御軸を用いた大域的な形状変形手法に関する研究」, 慶應義塾大学大学院, 政策メディア研究科, 1998.
- [23] OpenGL.org, OpenGL, <<http://www.opengl.org/>>.
- [24] 渡辺大地, ”リアルタイムグラフィックスのためのツールキットに関する研究”, 慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士論文, 1996.
- [25] 渡辺大地, FK Tool Kit System, <<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>>.
- [26] NVIDIA, <<http://jp.nvidia.com/page/home.html>>.
- [27] 石塚真貴男, 渡辺大地, “3DCG における作画アニメ調髪束先の形状変形手法”, 芸術科学会第 26 回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 2010.

発表論文

石塚真貴男, 渡辺大地, “3DCG における作画アニメ調髪束先の形状変形手法”, 芸術科学会第 26 回 NICOGRAPH 論文コンテスト, 2010.