

2008年度 卒業論文

樹木の根モデルの自動生成および  
簡易修正についての研究

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト  
学籍番号 M0105280  
田中 美穂

2008年度 卒業論文概要

論文題目

樹木の根モデルの自動生成および  
簡易修正についての研究

メディア学部

学籍番号：M0105280

氏名

田中 美穂

指導  
教員

渡辺 大地 講師

キーワード

3DCG、樹木、根、モデリング、FFD、細分割曲面

近年、コンピュータグラフィックスの分野では、自然を表現する映像や画像などに樹木や植物の3次元形状モデルを利用している。樹木のモデリングやレンダリングに関する研究は数多くされてきており、景観シミュレーションや映像コンテンツ、ゲームの分野などで利用されてきた。特に、モデリングにおいては作業の効率化を目的として樹木の形状を自動的に生成する研究が行われてきた。しかし樹木に関する研究のほとんどが、樹木の幹や枝、葉に注目したものであり、根に関するものは少ない。樹木における根はゲームや映像コンテンツで見ることが多く、地上部に出ている太い根が表現されている。根に関する既存研究は地下部に生えている細い根を表現したもので、地上部に出ている太い根を表現することはできてない。

そこで本研究では樹木の地上部に出ている太い根を根の生えている方向や長さを指定することで自動生成し、FFDと呼ばれる制御軸を動かすことで形状を変形させる手法を適用し、根の形状を変形する手法を提案する。本研究では、桜やケヤキなどの広葉樹を対象として根の自動生成および簡易修正を行った。本研究の手法を実装した結果、様々な形状の根が容易に作り出すことができた。

# 目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
第2章	樹木の根について	4
2.1	根の生態	4
2.2	根上がり現象	6
第3章	根の形状生成	8
3.1	根の本数、長さの入力	8
3.2	幹、根の頂点の決定	9
3.2.1	幹の頂点	10
3.2.2	根の頂点	14
3.2.3	根と根の接続部分の頂点	18
3.2.4	根元の頂点算出	19
3.3	面の生成	22
第4章	形状の編集	23
4.1	制御軸の構成	24
4.2	制御軸の用意	24
4.2.1	B-Spline 曲線	24
4.2.2	制御軸の生成	25
4.3	局所座標系の算出	26
4.4	制御軸の変形と変形後のモデルの逆算	28
第5章	細分化	29
第6章	検証と考察	31
6.1	結果	31
6.2	考察	33
6.3	まとめ	34
	謝辞	35



# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究背景と目的

近年、コンピュータグラフィックス (CG) の分野では、自然を表現する映像や画像などに樹木や植物の 3 次元形状モデルを利用している。樹木のモデリングやレンダリングに関する研究は数多くされてきた。特に、モデリングにおいては作業の効率化を目的として樹木の形状を自動的に生成する研究が行われてきた。このような手法は景観シミュレーションや映像コンテンツ、ゲームの分野などで利用されている。

樹木形状を生成する手法は様々なものがある。フラクタルと呼ばれる分岐法則を用いた手法 [1] や周りの環境や植物ホルモンを考慮して生成をする手法 [2][3]、樹木形状を生成するためのパラメータを設定して生成する手法 [4] などがある。また、2 次元画像を元に 3 次元の樹木形状を構成する手法 [5][6][7]、3DCG ソフトの Maya の Paint Effects に代表される 3 次元モデルライブラリを使用する手法もある。しかし、これらの手法は樹木の幹や枝に注目したものが多く、根に関する研究はあまりされていない。

樹木における根はゲームや映像コンテンツなどで見かけることが多く、この複雑な形状を手作業で作るには時間がかかり、困難なものとなっている。根に関する既存研究として Mechら [2] の水がある方向に根が伸びていく手法がある。また、KIMU[8] の水という環境に加え、土の固さや重力といった環境を考慮してリアル

な根を生成している手法もある。これらの研究で作られた根は地下部分に生えている細い根を表現したもので、地上部に出ている太い根を表現することはできていない。

モデリングソフトで樹木の根を作る場合、幹の部分から根を作りだしていく方法や、幹と根を別のパーツとして作り最後に結合させる手法などがある。どちらの方法で作るとしても、根1本1本の形を編集し、幹とのつなぎ目部分を滑らかにしなければならない。根の形状が全て同じであると不自然なものになってしまうため、必要な本数分だけ根の形状や伸びていく方向を変えていかなければならない。幹と根を別オブジェクトで結合させる場合、そのまま2つのオブジェクトを結合してしまうと根が幹に刺さっているように見えてしまい、樹木として不自然なものになってしまう。図1.1で不自然な幹と根の結合部分を示す。幹から根を作りだしていく方法でもつなぎ目部分を滑らかにするために細かい編集をしていかなければならない。この編集する作業も根の本数分必要となるため、とても時間がかかり、3DCG ツールを使い慣れている人でも手間のかかるものとなっている。

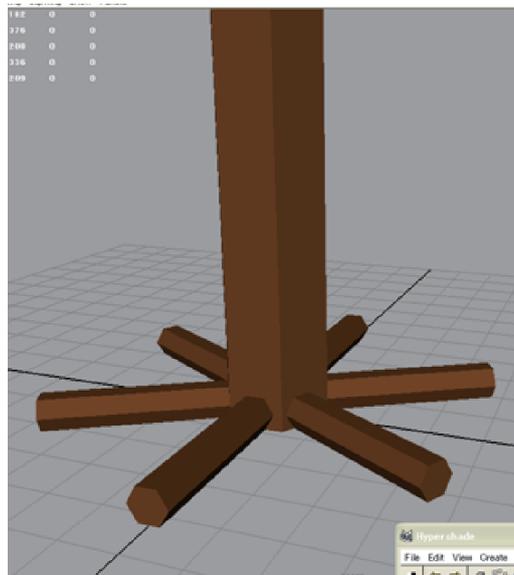


図 1.1: 幹と根の結合部分

そこで本研究では根の形状を作る作業を効率化することを目的とし、生成する根の本数と長さを入力すると根の基本形状ができ、その後簡単な操作で細かい編集をすることができる手法を提案する。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成は次のとおりである。第2章では根の生態と地上部に根がでる現象について述べる。第3章では根の形状の自動生成について述べる。第4章では根の形状を編集するFFDという手法について述べる。第5章では自動生成後の根の形状で直線的な表現となっている部分を滑らかにする細分割曲面について述べる。第6章では、3章、4章、5章で述べた方法で実装した結果と今後の展望や課題について述べる。

## 第 2 章

# 樹木の根について

### 2.1 根の生態

根は植物を支えると同時に水や栄養分を吸収する働きをする器官である。根系には2通りある。一方は主根型根系と呼ばれるもので、主根という太い根と側根という細い根からなり、双子葉植物に見られる。主根というのは、植物の胚に形成された幼根が発達したもので直根とも呼ばれる。ここから側根と呼ばれる根が生じる。側根は分岐順に従って1次側根、2次側根...のように呼ばれる。もう一方はひげ根型根系と呼ばれるもので、根が細く主根と側根の区別がない根からなり、単子葉植物に見られる [9][10]。図 2.1 に主根型根系、図 2.2 にひげ根型根系を示す。

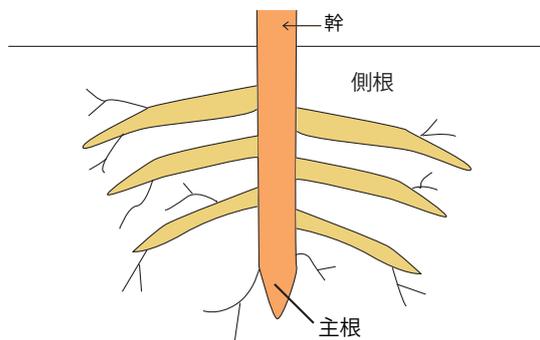


図 2.1: 主根型根系

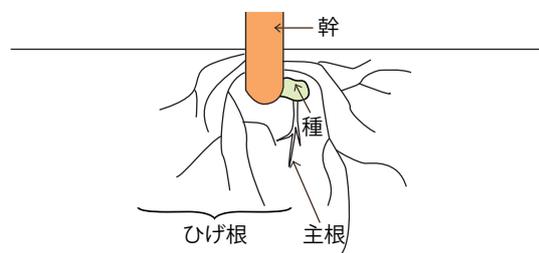


図 2.2: ひげ根型根系

本研究では、前者の根系に属する桜やケヤキなどの双子葉植物を対象に進めて

いく。

根の構造を図 2.3 に示す。根の最外層は表皮で覆われていて、その内側に皮層がある。皮層の最内層には内皮があり、水分の通路である木部と養分の通路となる師部を含む中心柱を囲んでいる。根の中心にある木部が放射状に腕を伸ばして、その腕と腕の間に師部が存在する。木部と師部からなる通導組織のことを維管束という。このように木部や師部が放射状に並んでいるものを放射維管束といい、主に根の部分に見られる。木部の腕の先端部分を原生木部といい、内側部分を後生木部という。原生木部の数は以下のような変異がある。植物の分類によって一定の傾向があり、同一個体内でも変異がみられることがある [10][11]。

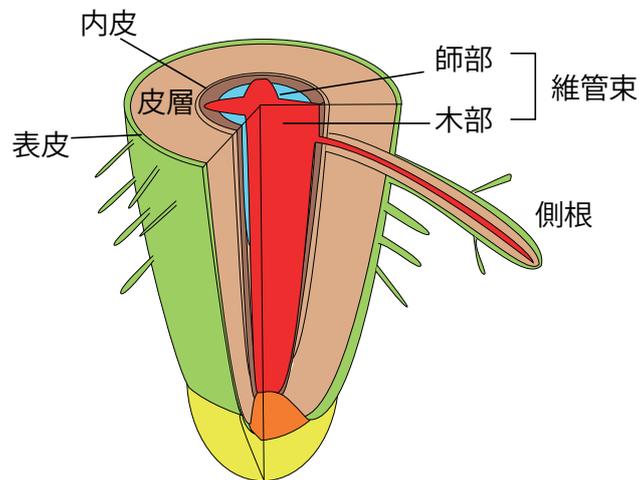


図 2.3: 根の内部構造

- 1 原型：原生木部が 1 つ。ミズニラ属にみられる。
- 2 原型：原生木部が 2 つ。シダ植物にみられる。
- 3 原型：原生木部が 3 つ。シダ植物、裸子植物、双子葉類にみられる。
- 4 原型：原生木部が 4 つ。裸子植物、双子葉類にみられる。
- 5 原型：原生木部が 5 つ。双子葉類にみられる。
- 多原型：原生木部が 6 つ以上。単子葉類にみられる。

主根から側根が出る場所は、種によってほぼ一定で、外側から見ると原生木部から分布する。側根は主根の放射中心柱における原生木部の外側または師部の外側から出ることが多いので、第1次側根の数は原生木部の数と同じであると推定できる。図2.4[a]は2原型、同図[b]は4原型、[c]は5原型の原生木部を表している。

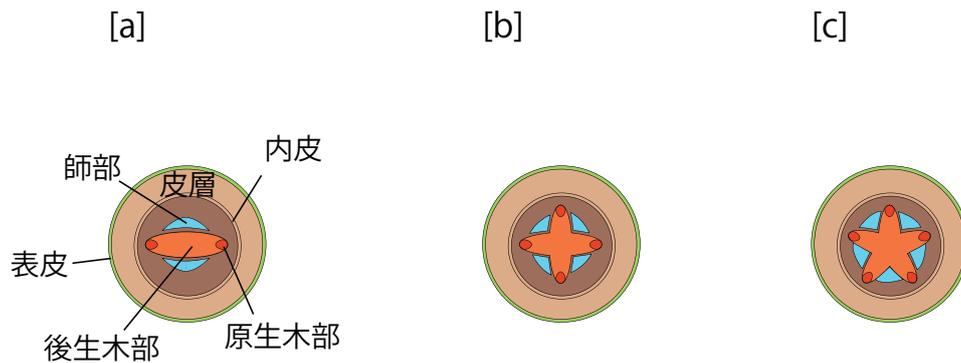


図 2.4: 原生木部の数による根のタイプ  
[a] : 2 原型 [b] : 4 原型 [c] : 5 原型

## 2.2 根上がり現象

図 2.5 のように地下部に潜っている根が地上部に出ていることを見ることもある。このような現象を「根上がり現象」という。樹木の根は本来ならば地中深くに伸びていくものである。この樹木の周りをコンクリート、アスファルトなどで囲ってしまうと地中に雨水が浸透せず、根が水分を求めて横に長く伸びて根元が太くなって根上がりの現象を引き起こしてしまう[12]。また、根上がりは風雪などで根が露出したものを根上がり現象ということもある。桜やケヤキといった双子葉の樹木は浅根性という根が地表近くに浅く分布する性質がある。主根があまり発達せず、側根がよく発達するという性質を持っている。このことから、地上部に出ている根は側根であることが分かる。



図 2.5: 根上がりしている樹木

## 第 3 章

# 根の形状生成

本研究では桜やケヤキなどの双子葉植物の根を対象とする。2 章で述べたように樹木の根上がり現象で地上部に見られる根は側根とする。根の本数を表す木部の数は双子葉植物では 4、5 本だが、実際には 6 方向に根ができている樹木もあるため、生成する本数は 4 本から 6 本とする。本研究では以下の手順で根を生成する

1. 根が生えている方向の数、長さを入力する。
2. 入力された情報に基づいて根、分岐してできる根、幹の頂点を求める。
3. 求めた頂点に面を貼り、テクスチャを貼る。
4. 根を編集するための軸を作り、形状を変形する。
5. モデルを細分割する。

この章では手順 1 から手順 4 について述べ、手順 5 の形状変形については 4 章、手順 6 の細分割については 5 章で述べる。

### 3.1 根の本数、長さの入力

まず、根が地上部に出ている方向の数  $R_n$  を入力する。根の数は木部の数によって決定するので、双子葉植物の木部の数である 4 本、5 本のものを作る。2 章で述

べたように木部の数は植物の分類によって一定の傾向があり、同一個体内でも違いが見られることもある。実際の樹木を見ると6方向から根が出ているものもあるため、生成する方向は4方向から6方向とする。幹と根の配置の関係を図3.1に示す。4方向の場合には図3.1[a]のように間隔は $90^\circ$ 、5方向の場合には同図[b]のように間隔は $72^\circ$ 、6方向の場合には同図[c]のように間隔は $60^\circ$ となる。根と根の間隔が全て同じであると不自然になってしまうため、方向数ごとに間隔を求めた後に $-5^\circ$ から $5^\circ$ の範囲で、かつ $\sum_{i=1}^{R_n} \delta^i = 0$ となるような値 $\delta^i$ を与え、間隔にばらつきを与えるものとする。

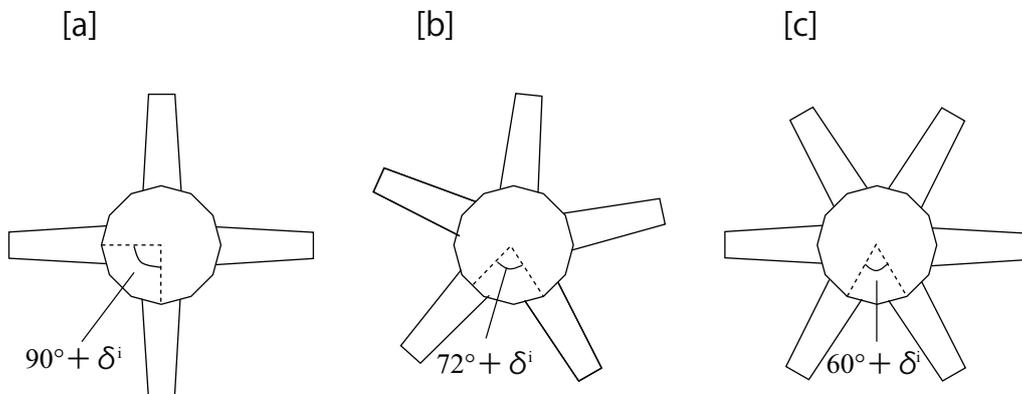


図 3.1: 上から見た幹と根の位置関係  
a: 4方向 b: 5方向 c: 6方向

次に、地上部に出ている根の長さ $R_l$ を入力する。 $R_l$ によって地上部に出ている根の長さを変更することができる。入力した値に $R_\beta^i (i = 1, 2, \dots, R_n)$ を90%から110%の間の値で拡大縮小をし、全ての根の長さにはばらつきを与える。図3.2で $R_l$ による長さの違いを示す。

### 3.2 幹、根の頂点の決定

入力したパラメータを基に樹木の幹、根を構成する頂点を算出していく。根と幹は角柱で構成するものとし、その角数を $M$ とする。根と幹をそのまま繋いでし

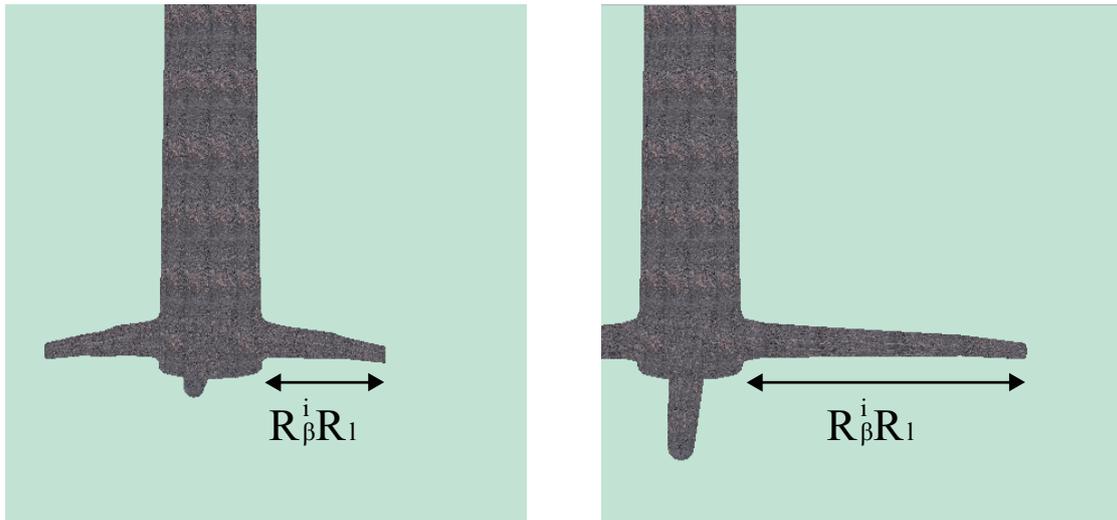


図 3.2: 入力した根の長さの違い

まうと接続部分が直線的なものとなりとても不自然なものになってしまう。そこで、根と幹を滑らかに接続するための頂点も新たに作る。

### 3.2.1 幹の頂点

幹は長さ  $S_l$ 、分割数  $S_d$  で構成する。分割数とは側面をいくつの面に分けるかという値である。図 3.3 は幹を 4 分割したものを表している。一番下の辺を底面、一番上の辺を上面とし、面を分割している辺を下から第 1 関節、第 2 関節、第 3 関節、 $\dots$ 、第  $S_d - 1$  関節としていく。



図 3.3: 幹の分割数

以下、幹の底面、各関節、上面それぞれを構成している頂点を「1周の頂点」と言う。幹はワールド座標  $y$  軸方向に沿って伸びるため、1周の頂点は  $xz$  平面上で頂点を1個ずつ回転させていけば良い。上底面、各関節の  $y$  座標は、一つ下の1周の頂点から  $\frac{S_L}{S_d} + S_y^j$  ずつずらしていく。図 3.4 は1周の頂点の位置を示し、図 3.5 は幹を構成している頂点の位置を示している。幹の頂点  $S^{i,j}$  は式 (3.1) を用いる。

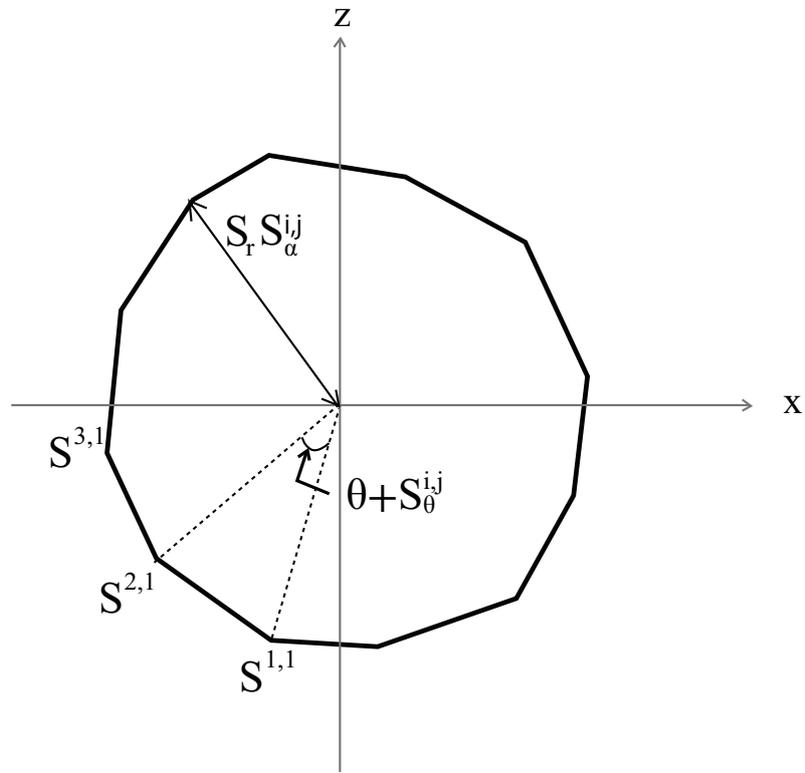


図 3.4:  $y$  軸方向から見た 1 周の頂点配置

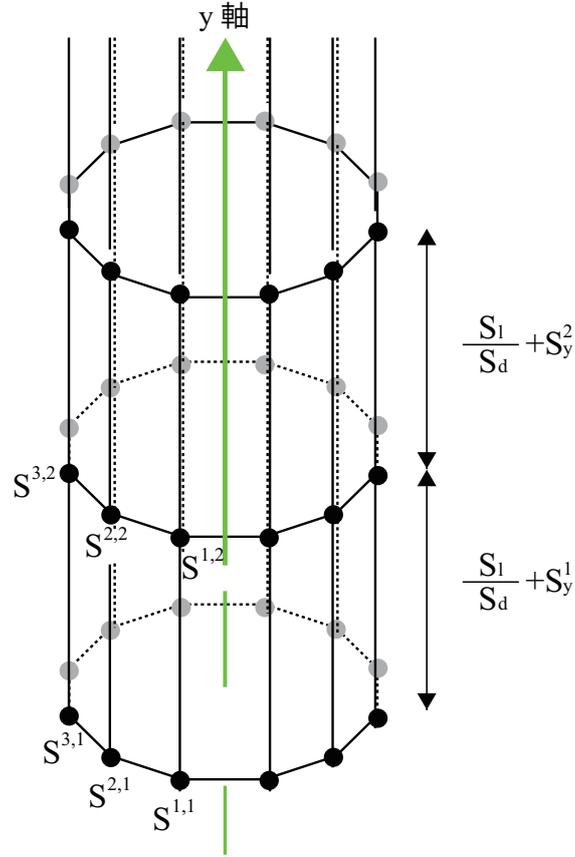


図 3.5: 幹を構成している頂点

$$\begin{aligned}
 S_x^{i,j} &= S_r S_\alpha^{i,j} \cos(i(\theta + S_\theta^{i,j})) \\
 S_y^{i,j} &= \begin{cases} 0 & (j=1) \\ \frac{j S_l S_y^j}{S_d} & (2 \leq j \leq S_d + 1) \end{cases} \\
 S_z^{i,j} &= S_r S_\alpha^{i,j} \sin(i(\theta + S_\theta^{i,j})) \\
 i &= 1, 2, 3, \dots, M \\
 j &= 1, 2, 3, \dots, S_d + 1
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$i$  は1周の頂点を表し、1から  $M$  まで順に作っていく。 $j$  は上底面、各関節を合わせた数を表しているもので1から  $j = S_d + 1$  まで順に作っていく。 $j = 1$  のときは底面、 $2 \leq j \leq S_d$  は各関節、 $j = S_d + 1$  は上面を表す。 $S_r$  は幹の半径を表し、 $\theta$

は頂点の回転角度を表し  $\theta = \frac{360^\circ}{M}$  である。幹の半径に 90% から 110% の範囲でランダムな値  $S_\alpha^{i,j}$ 、頂点の回転角度に  $-5^\circ$  から  $5^\circ$  の範囲で、かつ  $\sum_{i=1}^M S_\theta^{i,j} = 0$  となるような値  $S_\theta^{i,j}$ 、関節間の間隔に 90% から 110% の範囲でランダムな値  $S_y^j$  をそれぞれ与え、形状に凹凸をつけていく。

### 3.2.2 根の頂点

根も幹と同様に M 角柱でできている。分割数は  $R_d$  である。幹に一番近い部分を根元、先端部分を先端、面を分割している部分を第 1 関節、第 2 関節、第 3 関節、…、第  $R_d - 1$  関節としていく。幹同様に根元、先端、関節を構成している頂点を「1 周の頂点」と言う。頂点の算出は、まず 1 本目の根の頂点位置を求め、2 本目以降を回転させていく。根の 1 本目はワールド座標の  $x$  軸方向に伸びるため、1 周の頂点は  $yz$  平面上で頂点を 1 つずつ回転させていけば良い。根元、各関節、先端の  $x$  座標は 1 つ手前の 1 周の頂点から  $\frac{R_d}{R_d} + R_x^j$  ずつずらしていく。図 3.6 は  $x$  軸から見た 1 周の頂点の位置を示し、図 3.7 は根を構成している頂点の位置を示している。根の頂点  $R^{i,j}$  は式 (3.2) を用いる。

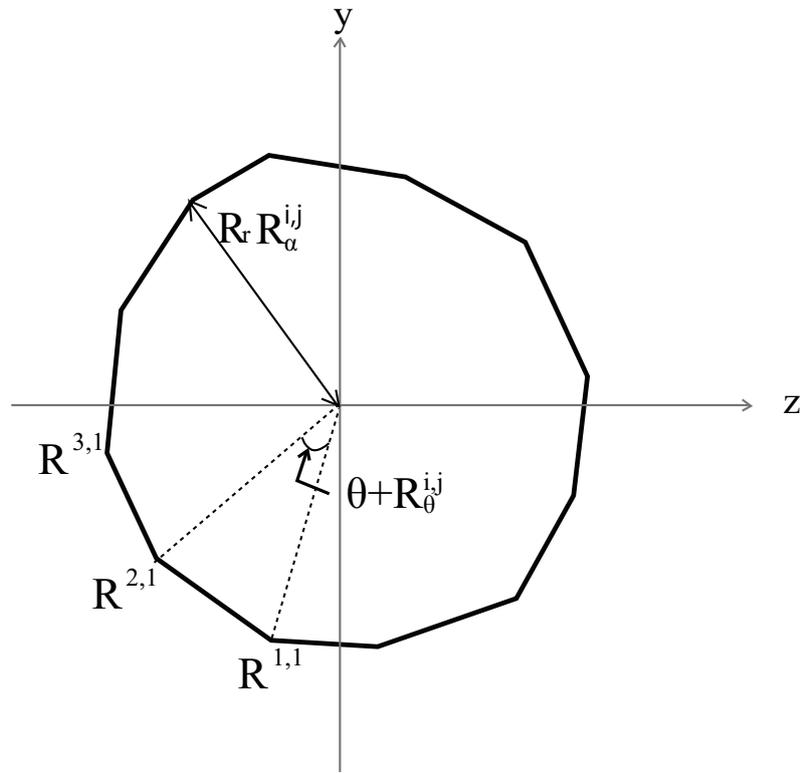


図 3.6:  $x$  軸から見た 1 周の頂点配置

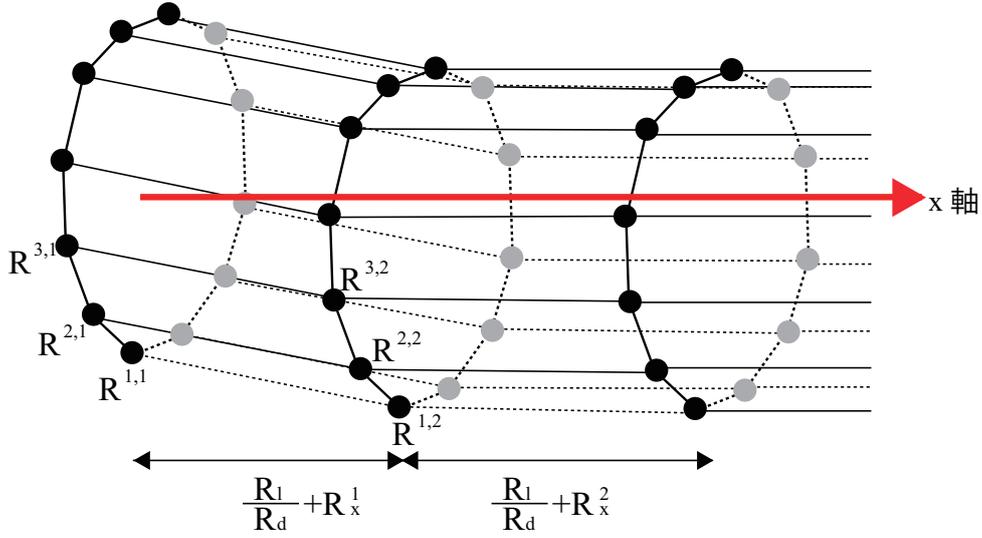


図 3.7: 根を構成している頂点

$$\begin{aligned}
 R_x^{i,j} &= \begin{cases} 0 & (j = 1) \\ \frac{jR_l R_x^j}{R_d} & (2 \leq j \leq R_d + 1) \end{cases} \\
 R_y^{i,j} &= R_r R_\alpha^{i,j} \sin(i(\theta + R_\theta^{i,j})) \\
 R_z^{i,j} &= R_r R_\alpha^{i,j} \cos(i(\theta + R_\theta^{i,j})) \\
 i &= 1, 2, 3, \dots, M \\
 j &= 1, 2, 3, \dots, R_d + 1
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

$i$  と  $j$  は幹と同様にそれぞれ 1 周の頂点、分割の数を表し、 $i$  は 1 から順に  $M$  まで、 $j$  は 1 から順に  $R_D + 1$  まで作っていく。 $R_r$  は根の半径を表し、 $\theta$  は頂点の回転角度を表し  $\theta = \frac{360^\circ}{M}$  である。 $j = 1$  のときは根元、 $2 \leq j \leq R_d$  は各関節、 $j = R_d + 1$  は先端を表す。根の半径に 90% から 110% の範囲でランダムな値  $R_\alpha^{i,j}$ 、頂点の回転角度に  $-5^\circ$  から  $5^\circ$  の範囲で、かつ  $\sum_{i=1}^M R_\theta^{i,j} = 0$  となるような値  $R_\theta^{i,j}$ 、間接間の間隔に 90% から 110% の範囲でランダムな値  $R_x^j$  をそれぞれ与え、形状に凹凸をつけていく。

根の伸びる方向は上下方向もあるので、1本の根の頂点を決めたら関節ごとにワールド座標  $y$  軸方向に移動させる。根は下方方向に伸びたり一部分が上方方向に伸びたり、根全体が垂れ下がっているような場合もある。これらの初期形状となるパターンを選ぶことができる。図 3.8 で根の初期形状のパターンを示す。

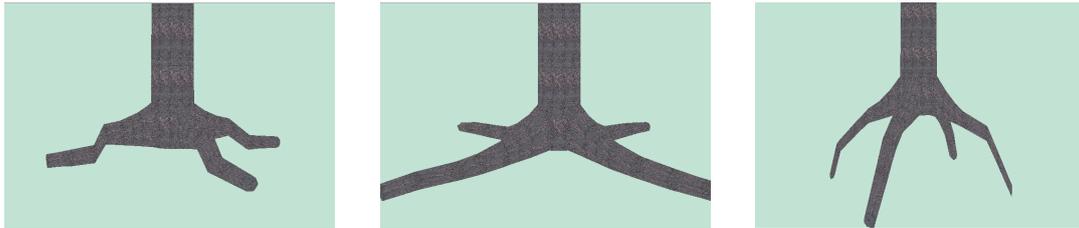


図 3.8: 根の初期形状

1本目の頂点の位置が決まったら、2本目以降の根の頂点を決めていく。1本目と同様に頂点を決定した後に、 $y$  軸を中心として回転させていく。このときの回転角度は根の数が4本か6本ならば  $\frac{360^\circ}{R_n}$  だが、5本の場合には3.1でも述べたとおり  $60^\circ$  と  $90^\circ$  を交互に回転させていく。

根は一方向から1本しか出ているのではなく、分岐していることがある。本研究では分岐数を乱数で0から2の値で決定する。0は分岐しない場合であり、最大2本まで分岐した根ができる。ただし、根が6本の場合には分岐させてしまうと、地上部に出ている根が多くなってしまうため分岐数は最大で1とする。ユーザの入力値で決めた方向数でできる根を  $R$ 、分岐した根を  $P, Q$  とする。本研究では  $P$  は  $R$  を  $y$  軸を中心に  $5^\circ$ 、 $Q$  は  $R$  を  $y$  軸を中心に  $-5^\circ$  回転させたところに生成する。図 3.9[a] は分岐数0の場合、[b] は分岐数1の場合、[c] は分岐数2の場合の根の位置関係を示している。なお、分岐した根の頂点を分岐数が1の場合には  $P$  の頂点を  $P^{i,j}$  とし、分岐数が2の場合には  $P$  の頂点を  $P^{i,j}$ 、 $Q$  の頂点を  $Q^{i,j}$  としていく。 $i$  と  $j$  は幹やユーザの入力で数が決まる根の頂点同様にそれぞれ1周分の頂点、分割の数を表している。

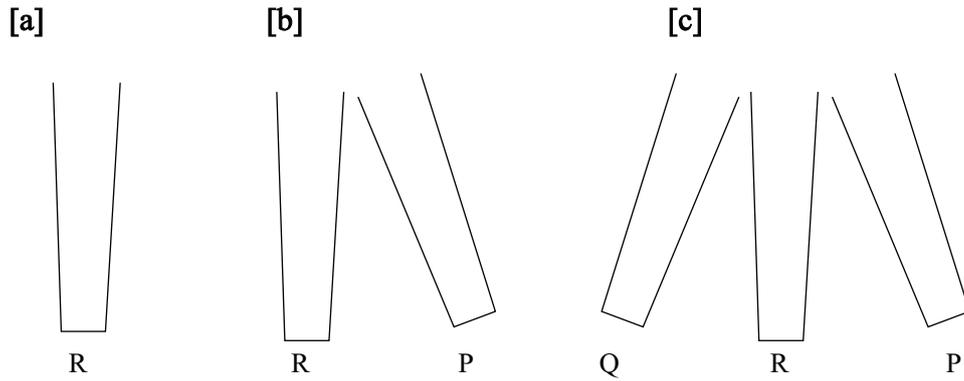


図 3.9: 根を構成している頂点  
 [a]: 分岐数 0 [b]: 分岐数 1 [c]: 分岐数 2

### 3.2.3 根と根の接続部分の頂点

根と根のつなぎ目部分にも面を貼る。そのために接続用の頂点を求める必要がある。 $x$  軸から見て縦方向に  $\frac{M}{2}$  個、根と根のつなぎ目部分を  $K$  等分するような頂点  $J^{i,j}$  を作る。図 3.10 は  $M = 12$ 、 $K = 3$  のときの頂点位置を示している。頂点  $J^{i,j}$  は式 (3.3) を用いて求める。

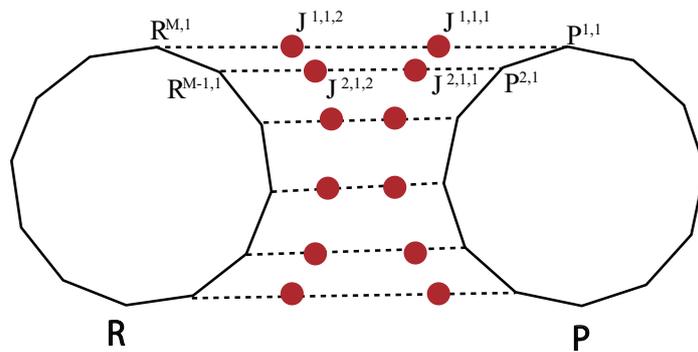


図 3.10: 根と根の接続部分

$$\begin{aligned}
\mathbf{J}^{i,j,k} &= \left(1 - \frac{k}{K}\right) \mathbf{R}^{M-i+1,j} + \frac{k}{K} \mathbf{P}^{i,j} \\
i &= 1, 2, \dots, \frac{M}{2} \\
j &= 1, 2 \\
k &= 1, 2, \dots, K
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$i$  は 1 から順に  $x$  軸から見た縦方向の頂点数  $\frac{M}{2}$  までである。 $j$  は根元と第 1 関節と 2 周作るので、 $j = 1, 2$  である。 $k$  は繋ぎ目部分を分割する数であり、 $k = 1, 2, \dots, K - 1$  となる。分岐数が 2 の場合も同様にして頂点を求めていく。

### 3.2.4 根元の頂点算出

根と幹をそのまま接続してしまうと、直線的な表現となってしまい不自然なものになってしまう。図 3.11 は現実世界における樹木の根元の様子を示しており、幹と根は滑らかに接続している。自然な根の形状を作る上ではこの接続部分の滑らかさを考慮しなければならない。



図 3.11: 樹木の根元部分

根元部分の不自然さを解決する手法として、斉藤 [13] の手法で使われている分枝部分の平滑化がある。これは、樹木形状の枝の生える接続部分（以下「分枝部

分」) に対して平滑化を行う手法である。図 3.12 は斎藤の分枝部分の平滑化を適用する箇所を示したものである。図 3.12 のように生成する枝の根元から根元にもっとも近い位置にある第一関節までとしている。本研究ではこの範囲を根元部分に適用させる。図 3.13 は本研究での平滑化の適用範囲を示したもので、図のように根元から根の第 1 関節と幹の底面と幹の第 1 関節までを接続する。

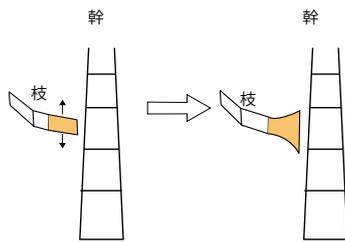


図 3.12: 枝の分枝部分の平滑化の適用範囲

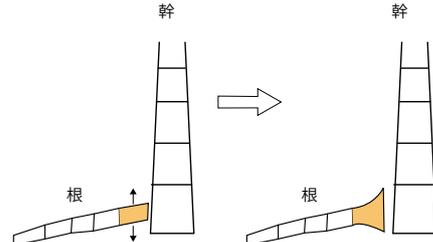


図 3.13: 根元の平滑化の適用範囲

本手法では根元の接続点を幹部分に設定する。図 3.14 は平滑化のための制御点を示し、図のように 3 箇所の制御点を用いて、平滑化した根元部分の頂点を算出する。制御点  $A$  を根元と幹との接続点とする。制御点  $B$  を根と幹との本来の接点とする。制御点  $C$  を根の第 1 関節の頂点とする。この 3 つの制御点を用いて図 3.14 のように  $A$  と  $C$  を結ぶ曲線状にしい頂点  $N$  を生成する。

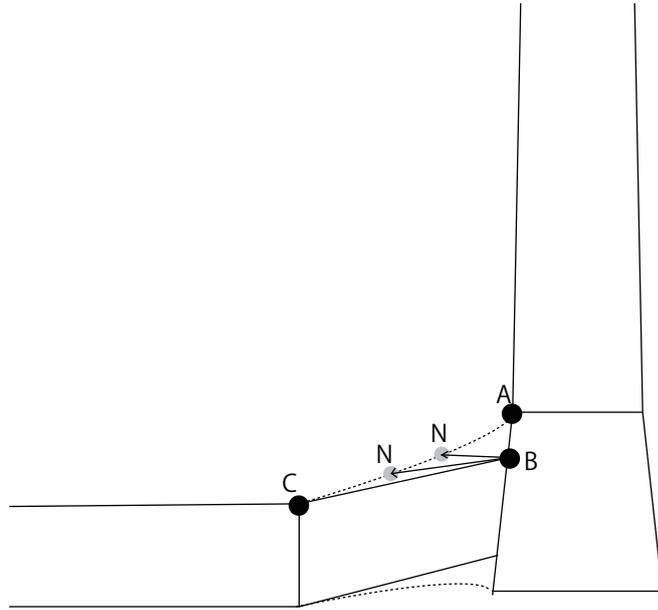


図 3.14: 樹木の根元部分

樹木は幹が傾くとあて材と呼ばれる補強および、姿勢を補正するための肥大成長が起こりまっすぐに立て直そうとする。広葉樹では「引っ張りあて材」と呼ばれる幹を引っ張るようなあて材が施される。図 3.15 は「引っ張りあて材」の様子を示している。このことを考慮して平滑化部分の頂点  $N^{i,j}$  を式 (3.4) を用いて求める。根元の平滑化に発生するあて材の量を  $E$  とする。式 (3.4) は制御点  $A, B, C$  と根を表現する頂点の数  $f$  個算出する。平滑化部分の分割数を  $g$  とし、新しい頂点を  $g - 1$  個求めることで、根元を構成する全ての新しい頂点を算出する。

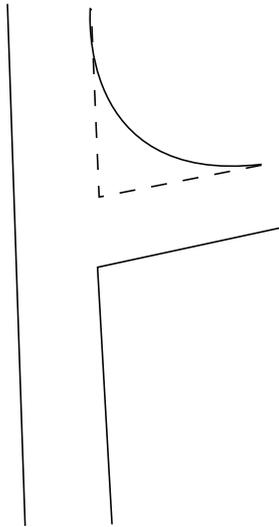


図 3.15: 引っ張りあて材

$$\begin{aligned}
 \mathbf{N}^{i,j} &= \left(1 - \frac{j}{g}\right)^E (\mathbf{A}^i - \mathbf{B}^i) + \frac{j}{g} (\mathbf{C}^i - \mathbf{B}^i) + \mathbf{B}^i \\
 i &= 1, 2, \dots, f \\
 j &= 0, 1, \dots, g-1
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

### 3.3 面の生成

形状を作る頂点が決定したら、面を貼っていく。幹の上底面、根の先端部分は  $M$  角形で面を貼り、その他の部分は 4 角形で面を貼る。

根の部分は根元部分から先端部分まで全ての面を貼るのではなく、第 1 関節部分から先端部分までを貼る。これは根と幹との平滑化部分を第 1 関節部と結合させているためである。根 1 本 1 本の面の側面を 4 角形で、先端部分を  $M$  角形で面を貼る。根が分岐する場合には根と根と結合している部分も 4 角形で面を貼っていく。根元の平滑化を行っている部分では、根元と幹を結合している部分、平滑化をしている部分、平滑化している部分と根の第 1 関節部を 4 角形の面で貼っていく。

# 第 4 章

## 形状の編集

本研究における提案手法では、根の形状を自動的に生成した後に、簡単な操作で変形をし形状を編集することができる。変形手法には大域的形状変形 [14][15] の一種である軸変形に山野上ら [16] の手法で使われている制御軸を用いた形状変形の手法を適用する。形状変形の流れは以下の通りである。

1. 変形対象となるモデルに対して変形媒体となる制御軸を作る。
2. モデルを制御軸に投影し、制御軸における局所座標系計算をする。
3. 制御軸を変形する。
4. 変形後の制御軸から変形後のモデルを再計算する。

山野上は、B-Spline 曲線の特徴を利用した変形媒体を提案している。この変形媒体を制御軸と呼ぶ。この制御軸に対して曲げ変形操作や捻り変形操作、太さ変形操作をすることで、モデルを大域的に変形させることができる。本研究では、この3つの変形方法のうち、曲げ変形操作を取り入れている。

なお、本章における数式内の変数名は3章のものとは独立しており、関連は無いものとする。

## 4.1 制御軸の構成

制御軸は、制御曲線と副軸から構成される。モデルと制御軸の構成を図 4.1 に示す。

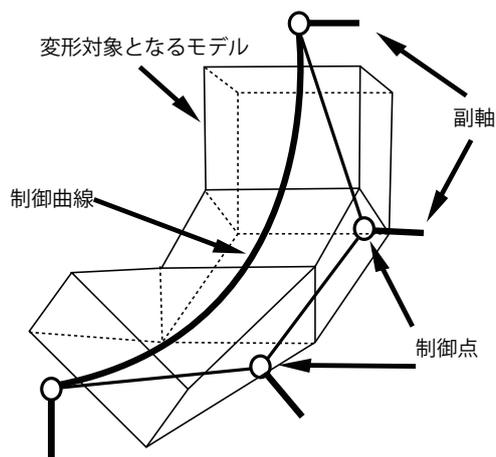


図 4.1: 制御軸の構成

まず、変形媒体となる制御軸を定義する。制御曲線は B-Spline 曲線で表わされる。副軸は制御軸曲線の各制御点の持つ局所座標系を示し、副軸の示す座標軸を副軸ベクトルと呼ぶ。副軸ベクトルの大きさや向きを利用することで、制御曲線の各パラメータ位置における局所座標系の大きさや向きを自由に変えることができる。また、副軸の方向から曲線の姿勢を把握することができる。

## 4.2 制御軸の用意

### 4.2.1 B-Spline 曲線

B-Spline 曲線は、階数  $s$ 、制御点  $C(i) (0 \leq i \leq n)$ 、そしてノット列  $x(i)$  から定義される曲線である。階数とは制御点の変形が影響する範囲を指し、ノット (knot) 列とはその影響範囲を指定するための節目 (パラメータ区間の境界値) である。各制御点ごとに B-Spline 基底関数と呼ばれる関数が存在する。B-Spline 基底関数と

は曲線の形状を変形した場合、その変形に各制御点の位置がどの程度影響しているかということを示す関数で、 $k$  次の B-Spline 基底関数  $N_{i,k}(t)$  は以下のように定義することができる。なお、 $k$  は次数と呼び  $s - 1$  に等しい。

$$\begin{aligned}
 N_{i,1}(t) &= x_i \leq t \leq x_{i+1} \quad \text{なら } 1 \text{ それ以外は } 0 \\
 N_{i,k}(t) &= \frac{(t - x_i)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t)N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \\
 \text{ただし } \frac{0}{0} &= 0
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

本稿では、制御軸で用いる制御曲線は制御点の数を根の根元、間接、先端の合計値である  $Q_d$  に設定し、制御曲線の初期位置を 1 本目の根の中心を通る位置として定義する。

#### 4.2.2 制御軸の生成

図 4.2 は  $Q_d = 5$  のときの 1 本の根の各間接の中心に制御点を設置した様子を示している。この制御点の位置が初期位置となり、これを結ぶ制御直線を生成する。

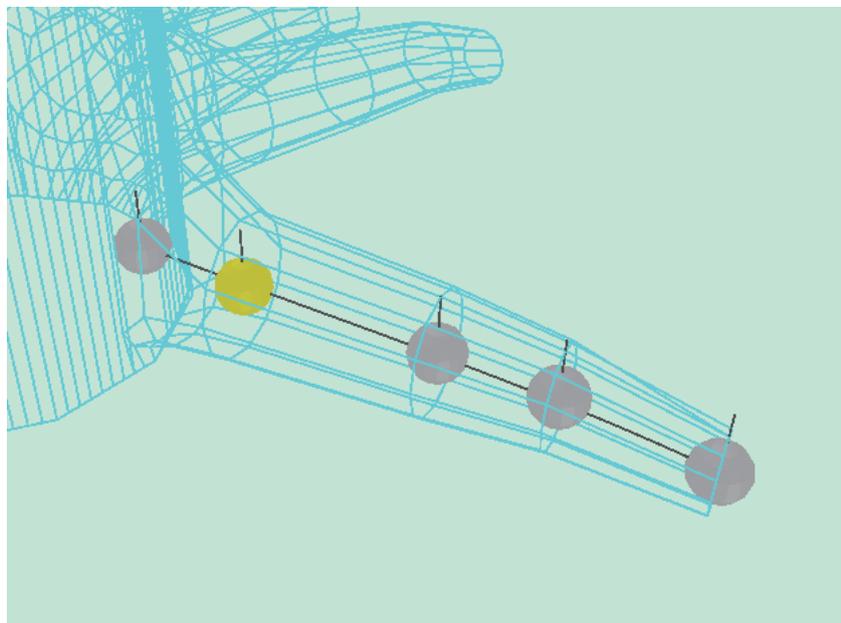


図 4.2: 制御軸の初期位置

根の断面の角数を  $h$  とする。制御点の位置となる間接の中心  $V_i$  は根の頂点の位置  $Q_{i,j}$  を使い、次の式 (4.2) で求める。ここで  $i$  は制御点の個数を表し、 $i = 1$  のときは根元、 $2 \leq i \leq Q_d - 1$  のときは関節部分、 $i = Q_d$  のときは先端を表す。

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{Q_{1,i} + Q_{1+\frac{h}{2},i}}{2} \\ i &= 1, 2, \dots, Q_d \end{aligned} \quad (4.2)$$

根は 1 本だけではなく、生成した本数分変形することができる。他の根を動かす場合には、式 (4.2) を使い、選択した根に対応する制御軸を生成する。

### 4.3 局所座標系の算出

次に変形対象となるモデルの頂点  $P$  を制御軸に投影する。ここで投影とは、頂点  $P$  からもっとも近い制御曲線上にある点  $M$  を得ることである。ここで頂点  $P$  から制御曲線状に投影した点を  $M_t$  とする。 $t(0 \leq t \leq 1)$  は制御曲線におけるパラメータである。点  $P$  の位置を把握するためには、点  $M(t)$  と点  $P$  の差ベクトル  $D_i$  を変形対象の根の頂点数  $i$  個保持しておけばよい。

$$D_i = P_i - M_i \quad (4.3)$$

$M_t$  における局所座標系の算出方法でもっとも有名なのはフルネー標構 (Frenet Frame) である。しかし、フルネー標構による局所座標系は直線形状の場合は次のような問題点がある

- 直線形状の場合は法線ベクトルが定まらない。
- 曲線が途中で曲率が反転してしまうような形状の場合、法線ベクトルが  $180^\circ$  回転してしまう。図 4.3 は反転した法線ベクトルを示している。

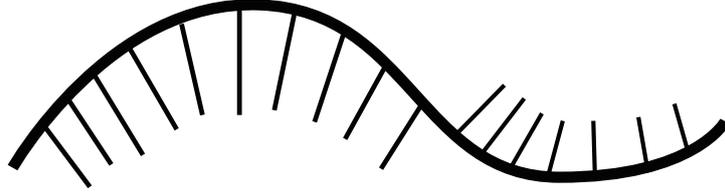


図 4.3: 法線ベクトルの反転

この問題を解決するために、副軸ベクトルを定義する。副軸ベクトルは、各制御点の局所座標系を意味するものである。 $M_t$  における局所座標系を  $\sum(M_t; \mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$  とする。各座標系軸を表すベクトル  $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$  は単位ベクトルとする。 $\sum(M_t)$  は次のようにして求めることができる。

1.  $M_t$  における一階微分ベクトルを式 (4.4) を用いて求める。微分ベクトルは B-Spline 曲線のパラメータ  $t$  点における接線ベクトルなので、 $\mathbf{e}_1$  となる。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{e}_1 &= \sum_{i=0}^n N'_{i,n}(t) \mathbf{R}_i \\
 N'_{i,1}(t) &= 0 \\
 N'_{i,k}(t) &= \frac{N_{i,k-1}(t) + (t - x_i) N'_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t) N'_{i+1,k-1}(t) - N_{iL1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}}
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

2. 副軸ベクトルを  $\mathbf{d}_i$  として、点  $M_t$  における  $\mathbf{e}_2$  を式 (4.5) を用いて求める。

$$\mathbf{e}_2 = \sum_{i=0}^n N_{i,n}(t) \mathbf{d}_i \tag{4.5}$$

このとき B-Spline 曲線基底関数  $N_{i,k}(t)$  は式 (4.1) を用いる。

3. 点  $M(t)$  における  $e_3$  を  $e_1$  と  $e_2$  の外積から求める。

$$e_3 = e_1 \times e_2 \quad (4.6)$$

以上が点  $M(t)$  における局所座標系  $\Sigma(M; e_1, e_2, e_3)$  である。図 4.4 は局所座標系  $\Sigma$  を表している。

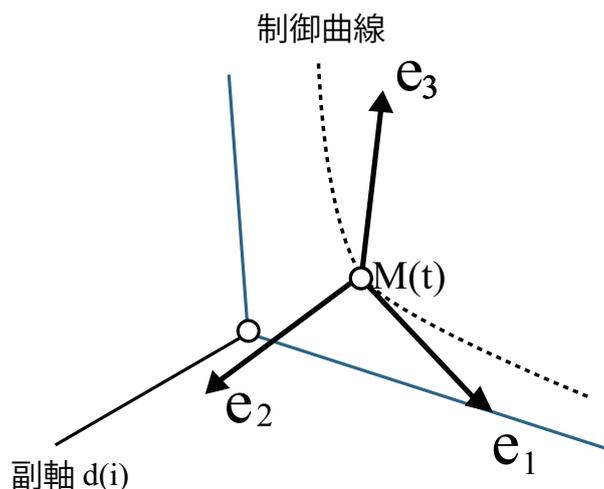


図 4.4: 制御軸の構成

#### 4.4 制御軸の変形と変形後のモデルの逆算

モデルの変形媒体となる制御軸の形を変更する。制御軸の形状は制御点の位置によって定まるので、制御軸を変形させるには制御点を移動すればよい。

形状を変更した制御軸をもとに、変形後のモデルを計算する。4.3 節で述べたように点  $P$  の位置は投影した点  $M$  と点  $P$  と点  $M$  との差ベクトル  $D$  から式 (4.7) で求めることができる。

$$P = M + D \quad (4.7)$$

# 第 5 章

## 細分化

根と根のつなぎ目部分や根元の平滑化部分が自動生成後の状態では直線的なものとなっていて不自然となっている。これを滑らかにするために細分割曲面を使う。細分割曲面とは、初期の面に単純な分割操作を適用して滑らかな曲面を得る手法である [17]。

細分割の操作は分割ステップと平滑化ステップの 2 つからなる。分割ステップでは頂点を追加し、面の分割の方法を決める。これには、4 角形面を面分割の基本とするものや、3 角形面を分割するものもある。図 5.1[a] で 4 角形面を面分割したものを、同図 [b] で 3 角形面を面分割したものを示す。平滑化ステップでは、それぞれの頂点の位置が修正される。これは、修正したい頂点と、その頂点に接続している他の頂点の重みづけ平均によって行われる。この重みをマスクと呼ぶ。

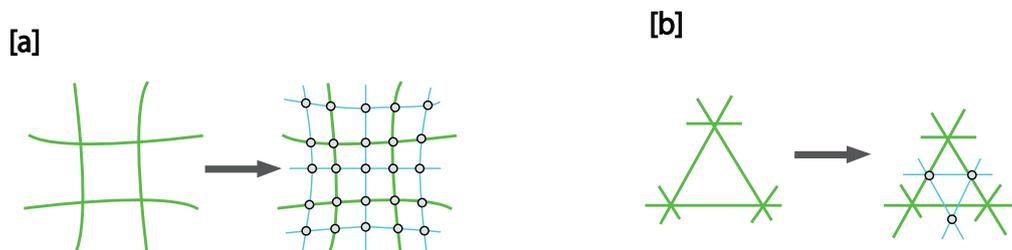


図 5.1: 分割ステップ

[a] 4 角形面の面分割 [b] 3 角形面の面分割

分割の方法やマスクの違いによって、カットマル・クラーク細分割曲面やループ細分割曲面などいくつかの手法がある。本研究では、カットマル・クラーク細分割曲面を樹木モデル全体に対して適用させる。

なお、本章における数式内の変数名は3章、4章のものとは独立しており、関連は無いものとする。

カットマル・クラーク細分割曲面は、図 5.1[a] の四角形を基本としており、分割ステップでは各面の中心と各辺の中心に頂点を配置し、それらを結んで分割を行う。カットマル・クラーク細分割曲面の細分割規則は次のとおりである [18]。

1. 新しい面点を生成する。

各面に対して、面を構成するすべての頂点の平均をその座標とする新しい面点 (face point) を生成する。

2. 新しい辺点を生成する。

各辺に対して、辺の両端点とその辺の両側の新しい面点の平均をその座標とする新しい辺点 (edge point) を生成する。

3. 頂点位置を更新する。

頂点 (vertex point) の座標を式 5.1 を用いて更新する。

$$\frac{Q}{2} + \frac{2R}{n} + \frac{S(n-3)}{n} \quad (5.1)$$

ここで、 $n$  は面を作っている角数を表し、 $Q$  はその頂点到隣接する全ての新しい面点の平均であり、 $R$  はその頂点を端点として持つ古い辺の中点の平均、 $S$  は頂点の元の座標である。

# 第 6 章

## 検証と考察

### 6.1 結果

3章、4章、5章でそれぞれ述べた根の形状生成と FFD、そして細分割曲面の実現手法を、3D グラフィックツールキットである FK System[19] を用いて実装を行った。図 6.1 は 4章から 5章で述べた手法で生成した根モデルである。本数や長さを変えたり、自動生成後の編集で様々な形状の根を作ることができた。

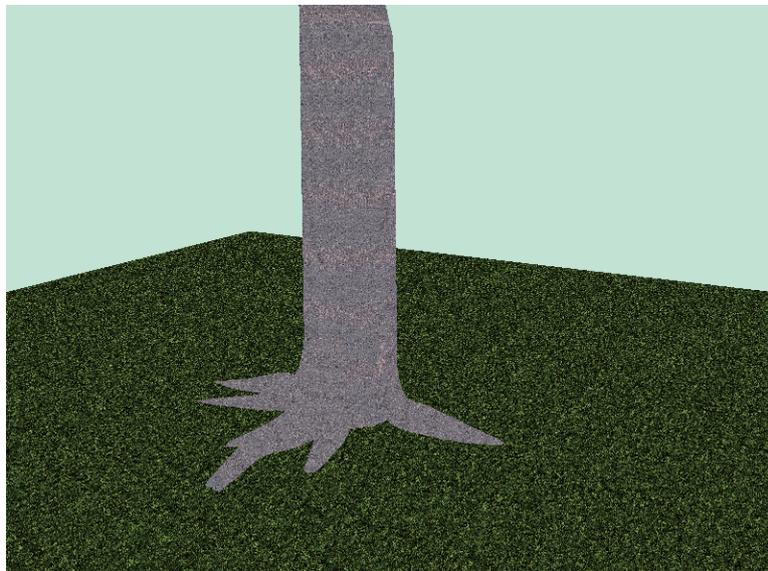


図 6.1: 根形状の生成

図 6.2 は最初に入力する根の本数や長さを変えて自動生成をした直後のものであ

る。入力された情報を元に様々な形状のものが確認できた。

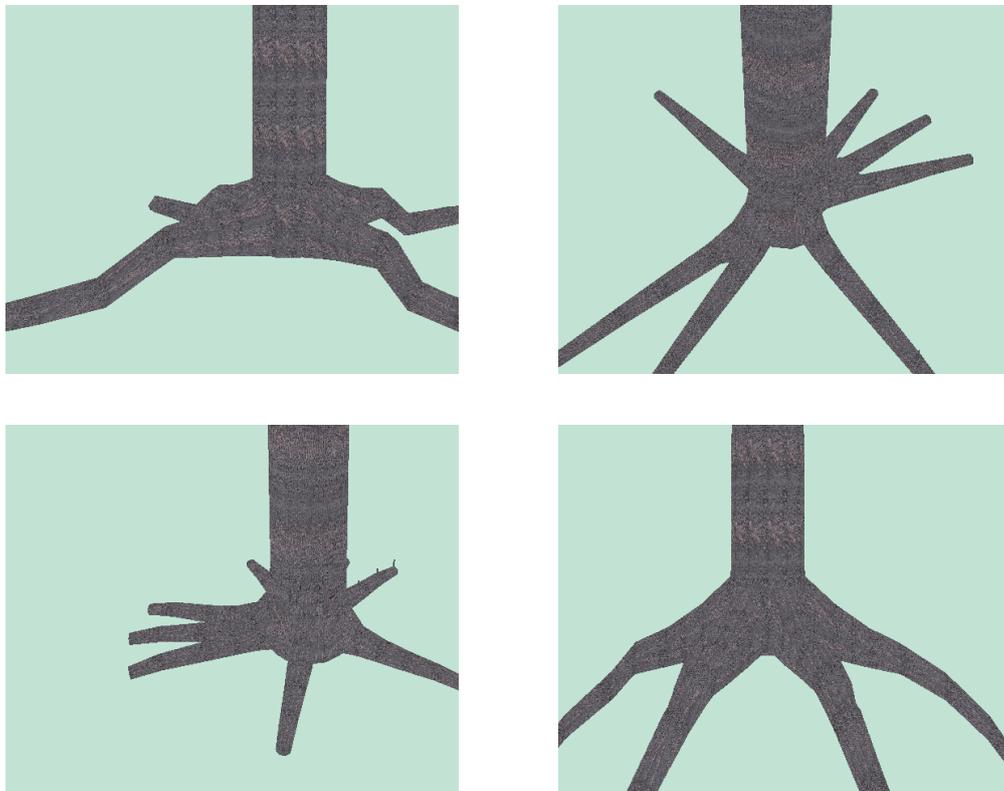


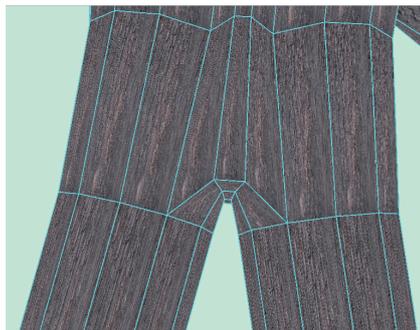
図 6.2: 本数、長さの違い

図 6.3 は幹の根のつなぎ目部分を平滑化処理したものである。平滑化によって根が幹に刺さっているように見えてしまう問題を解決できたことがわかる。

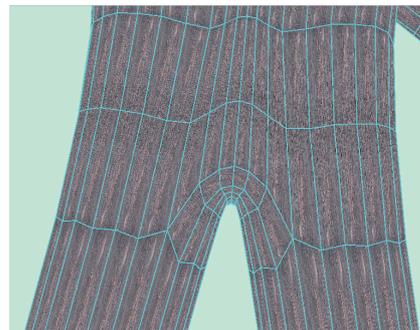


図 6.3: 根元の平滑化

図 6.4 は編集後に細分割を行ったものである。これにより、根と根の分かれ目、根元の平滑化部分をより滑らかにすることができた。



細分割前



細分割後

図 6.4: 細分割

## 6.2 考察

本研究では、根のモデルを自動生成し FFD による形状の簡易修正、細分割曲面による滑らかな表現を実現することができた。手作業で根を作る場合に困難である根と幹のつなぎ目部分の平滑化処理や、根 1 本 1 本の形状を変える簡易修正が実

現することができ、目的を達成できたと言える。しかし、自然にある樹木の根は根上がり現象で分岐した根も地上部に出ることがあったり、斜面などの地形に合わせて根が地上部に出ている場合もある。そのため、分岐した根の形状や地形に合わせた根の形状を作る必要がある。また、本研究では樹木の幹と根を作り、根の部分のみを編集することができたが、1本の樹木を作るには枝や葉も必要となってくるためこれらの自動生成と組み合わせて1本の樹木を考案していく必要がある。

### 6.3 まとめ

本手法では生成する根の本数と長さを入力することで形状を自動生成し、制御軸を動かすことで簡単に修正をすることができた。これは目的に合わせた根のモデルを作る作業を効率化できる手法である。根の形状を変形させる手法にはFFDを利用した。FFDは変形媒体となる制御軸を作り、モデルと関連付けることで変形を行う。制御点を動かすことで制御軸を変形してモデルを変形していくので、モデルの形状変形が容易にできる。根元の部分の平滑化部分や、根の分岐部分をより滑らかにする手法として、細分割曲面を利用した。これはモデルを作っている面に新しい頂点を作って頂点位置を調整することによりモデル全体的に滑らかな表現が可能となる。細分割曲面を利用することで、これまで手作業では時間がかかっていた、つなぎ目部分を自動的に行うことができるようになった。

樹木の根のモデルを自動的に作り、それを簡易修正するという目的は達成できたが、いくつかの課題が残っている。現実には地上部に出ている根は分岐しているものもあり、斜面などでは地形に沿って根が地上部に出ている。このように分岐した根の形状や地形に合わせた根の生成をすることでより自然な根を作りだすことができる。また、本手法では樹木の幹と根のみを生成したが、実際にゲームや映像コンテンツ等で使われる時には枝や葉も同時に作らなければならない。これまでの樹木の自動生成の手法と組み合わせて樹木1本の根、幹、枝、葉が生成する手法を考案していく必要がある。

# 謝辞

この研究を進めるに当たり、研究方針や手法など多くのご指導をしていただきました本校メディア学部の渡辺大地講師に心より感謝いたします。また、研究の支援、助言をくださったゲームサイエンスプロジェクトの先輩方、研究のことだけでなく様々な相談にのってくださった友人たちに感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 桑原教彰, 鉄谷信二, 志和新一, 岸野文郎, ”フラクタルを用いた階層的な樹木形状表現による3次元樹木画像の高速生方法”, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J78-DII, No.7, pp.1091-1104, 1995.
- [2] R.Mech and P.Prusinkiewicz, ”Visual Models of Plants Interacting with Their Environment ”, SIGGRAPH96,pp.397 - 410, 1996.
- [3] 千葉 則茂, 大川 俊一, 村岡 一信, 三浦 守, ”CGのための樹木の成長モデルー架空の「植物ホルモン」による自然な樹形の生成”, 電子情報通信学会論文誌, D-II, Vol.J76-DII, No8, pp.1722 - 1734, 1993.
- [4] J.WEBER, and J.PENN, ”Creation and rendering of realistic trees ”, SIGGRAPH 95 Computer Graphics Proceedings, pp.119-128, 1995.
- [5] 坂口竜己, 大谷淳, 中津良平, ”実写映像に基づいた三次元樹木モデルの生成”, 電子情報通信学会論文誌, D-II, vol.J82-D-II, no.9, pp.1469-1477, 1999.
- [6] 岡部誠, 五十嵐健夫, ”手書きスケッチに基づく樹木の3次元モデリング”, 情報処理学会研究報告, 「グラフィクスとCAD」, No.112-8, pp.41-46, 2003.
- [7] 桑原教彰, 志和新一, 岸野文郎, 新井民夫, ” 樹木画像を入力とする3次元樹木形状のフラクタルモデルの自動推定方法についての評価 ”, 画像電子学会誌, Vol.25, No.1, pp.45-53, 1996.

- [8] KIMU Chijun, "A Growth Model for Root Systems of Virtual Plants with Soil and Moisture Control", 電子情報通信学会, Vol.E89-D, No.5, 1743-1750, 2006.
- [9] H. de Kroon, "根の生態学", シュプリンガー・ジャパン株式会社, 2008.
- [10] 中山剛, "BotanyWEB", <http://www.biol.tsukuba.ac.jp/algae/BotanyWEB/>
- [11] 福原達人, "植物形態学" <http://www.fukuoka-edu.ac.jp/fukuhara/keitai/>
- [12] 岩田彰隆, 木田幸男, 甲野毅, 苅住昇, "ケヤキ街路樹の根系成長が歩道に与える影響", ランドスケープ研究: 日本造園学会誌, Vol.59, No.5(19960329) pp. 49-52, 1996.
- [13] 斉藤寛明, "コブ形状および分枝部分の平滑化を考慮した写実的な樹木形状の生成に関する研究", 東京工科大学学士論文, 2003.
- [14] 阿倍雅樹, "ボリュームレンダリングを用いたエネルギー波のリアルタイム形状変形", 東京工科大学学士論文, 2007.
- [15] 室伏絹子, "3DCGにおけるFFDを用いた魚が泳ぐ際の体の変形に関する研究", 東京工科大学学士論文, 2003.
- [16] 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.
- [17] "コンピュータグラフィックス", CG-ARTS協会, 2004.
- [18] 三浦憲二郎, "3次元形状表現の基礎 -細分割曲面による形状表現-", 日本設計工学会, Vol.39, No.12, pp.633-641, 2004.
- [19] 渡辺大地, "FK Tool Kit System", <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>