

2011年度 卒業論文

腐朽による樹洞形状の  
自動生成に関する研究

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 M0108131  
木島 亮祐

2011年度 卒業論文概要

論文題目

腐朽による樹洞形状の  
自動生成に関する研究

メディア学部

学籍番号：M0108131

氏名

木島 亮祐

指導  
教員

渡辺 大地 講師

キーワード

3DCG、樹木、樹洞、モデリング

近年、3次元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草花の3次元形状モデルを利用している。それらの樹木や草花を写実的に見せるためには、それぞれの3次元形状モデルに対して自然の現象による個性的な変化を考慮する必要がある。樹木に関する研究はモデリングにおける作業の効率化を主とした自動生成が盛んであるが、その多くは樹木の幹や枝の分岐に注目したものであり、樹木の個性的な特徴に関する研究は少ない。樹木の個性的な特徴の一つに樹洞という特徴がある。樹洞は樹木の内部が空洞化した状態のことであり、鳥類や鼠のような小動物が巣穴として利用することもある。腐朽によってできる樹洞の場合、空洞の入り口になる傷口は空洞化した部分が支えていた自重を支えるために膨らんで柱の機能を持つ特徴がある。また、傷口の周囲では樹皮も傷口が迂回するように変形する点も特徴である。そのため傷口の形状によって樹皮が迂回する流れも多様に変化する。

本研究では数値入力と傷口の形状を設定したことによって、自然現象を擬似的に再現した樹洞形状のモデリングシステムを提案する。傷口の形状については5次のBézier曲線を2つ使用した輪状で設定した。また、傷口が膨らむ様子については、傷口の向きが地面から垂直な方向に近づく程膨らむこととする他に、乱数値により大きさを変化することで凹凸をつけた。樹皮が迂回する様子については、複数並べたポリラインの頂点を移動することで表現した。

最後に、既存の樹木モデルに対して樹洞形状を生成して検証を行った。傷口の形状を変形して生成した樹洞形状の比較では、傷口の膨らみ具合が柱のように膨らむ様子や樹皮が傷口を迂回するように変形する様子を再現できた。一方で、傷口の形状によっては樹木モデル、傷口が膨らんだ形状、樹皮の形状がそれぞれ干渉する問題点が判明した。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究の背景と目的	1
1.2	本論文の構成	4
<b>第2章</b>	<b>樹洞について</b>	<b>5</b>
<b>第3章</b>	<b>樹洞形状の生成</b>	<b>9</b>
3.1	膨らみ形状の生成	9
3.1.1	基本形状の生成	9
3.1.2	膨らみ形状の形状設定	12
3.2	樹木が傷口周辺を避けて樹皮を生成する様子の表現	14
3.2.1	樹皮形状の設定	14
3.2.2	樹皮形状の作成	18
<b>第4章</b>	<b>検証と考察</b>	<b>23</b>
4.1	検証	23
4.2	考察	26
<b>第5章</b>	<b>まとめ</b>	<b>28</b>
	<b>謝辞</b>	<b>29</b>
	<b>参考文献</b>	<b>30</b>

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究の背景と目的

3次元コンピュータグラフィックス(以下、3DCG)の分野では、自然風景を表現する映像や画像に樹木の3次元形状モデル(以下、樹木モデル)を利用している。しかし、樹木や植物の形状は複雑であり手作業でモデリングをするには時間を必要とする。近年、その手間を解消するためにそれらの3Dモデルを自動的に生成するための研究が多く成されており、それらの研究は景観シミュレーションや大量の樹木形状が必要となる映像コンテンツなどの分野で利用されてきた。

特に樹木のモデリングに関する研究は幹や枝振り、根のように樹木の分岐に関する研究が多く存在する。例えば金丸ら [1] は樹木の枝葉と光源をそれぞれ球で近似して受光量を求める手法を提案した。これにより枝が受光量不足を認識して十分な光量を得ることができる位置を求めて横方向や下方向に伸びた後、光の方向へ伸びる現象を表現した。一方で、岡部ら [2] は手書きスケッチを基に任意の形状の樹木モデルをインタラクティブに生成するためのインターフェースを提案した。全ての枝を2本のストロークのペアで表現し、各ペアを回転して3Dの樹木モデルを生成することで、分岐規則に縛られず簡単に樹木形状の生成を可能にした。大志田ら [3] は幹や枝葉などの地上部と地下部である根が相互作用する成長モデルを提案した。大志田らは、地上部における受光量と地下部における養水分量のバランスが樹木の成長と密接に関係している点や、樹木が地下部から地上部へ養水分

を輸送できる構造を持つ点を考慮することで、地上部の成長と地下部の成長が相互に影響する成長シミュレーションを可能とした。他にも L-System という、植物の成長過程を定式化した手法を用いた研究 [4][5][6] や、自己相似性が特徴なフラクタル理論を用いた研究 [7][8][9][10] もある。

一方で隆起のように樹木特有の個性的な形状に関する研究は、樹木の分岐に関する研究に比べて少ない。Lefebvre ら [11] は樹皮の弾性を考慮して樹木の表面にヒビを生成する研究を行った。Lefebvre らは弾性を考慮することによって、樹木の表面にヒビが広がる様子やヒビ同士が相互に影響を与える現象を実現した。広田ら [12] は樹木の成長による樹皮のヒビ割れや剥離現象を考慮した研究を行った。広田らは樹皮を複数層にモデル化し、内層が成長によって肥大化して表層に影響を与えてヒビ割れたり剥離したりする様子を、バネを用いることで実現した。また、斉藤 [13] は樹木の奇形成長によってできるコブ形状に着目した。斉藤はコブ形状は幹や枝から生えた芽が樹皮の中に埋もれたまま分岐をした結果できる点に着目し、その発生要因をパラメータで制御することによってコブ形状の生成を実現した。

これらの個性的な形状に関する研究が少ないのは景観シミュレーション等で一度に大量の樹木モデルを利用することが多いため、必要最低限の精度で生成することによって計算コストを抑えることを重視するからである。そのため樹皮やコブ形状等を表現した高品質な樹木のモデリングには、樹木の分岐に関する研究手法によって生成した樹木モデルを手作業で変形するか、それぞれの形状に着目した手法を用いる必要がある。

本研究ではそのような個性的な形状の一つである樹洞に着目した。樹皮やコブ形状の他に、樹木形状の質を高める個性的な形状として図 1.1[14] に示す樹洞が存在する。



図 1.1: 樹洞の様子

樹洞は樹木内部に空洞を持ち、空洞の入り口は独特の膨らみを持つ形状である。この樹洞はコンテンツにおいて樹木の形状に個性を持たせるためや、鳥類や鼠のような小動物が隠れ家として出入りする表現のために用いることがある。現実において樹洞形状ができる多くの原因は、樹木の表面に何らかの理由で傷が生じたときにその傷口から木を腐らせる木材腐朽菌が侵入することである。特に、空洞の入り口になる傷口は空洞化した部分が支えていた自重を支えるために膨らむ点や傷口の周囲に存在する樹皮が影響を受けて迂回するように変形する点も特徴である。そのため傷口が膨らむ様子や周囲の樹皮が変化の様子は傷口の形状によって多様に変化する。この樹洞形状を 3DCG ツールを用いて作る場合、傷口の形状を変化させる度にこれらの特徴を考慮して修正するには労力を要する。

そこで本研究では既存の樹木モデルに対して樹洞の傷口とその周辺に存在する樹皮の 3次元形状を作ることを目的として、樹洞の特徴を考慮した形状の生成手法を提案する。ここで、樹木内部にできる空洞については生成の対象外とした。傷口の形状生成の手順として、まず 2次元平面上にて Bézier 曲線で作成した曲線上に連続する点を繋げて得たポリラインを傷口の基本となる形状とした。作成した基本形状は、各頂点を樹木モデル内部の点に対して射影することで、基本形状を樹木モデルの表面に沿わせた。その後、ポリラインの各頂点に多角形を複数配置

してそれぞれの頂点毎に面を貼ることで傷口の形状を作成した。樹皮の形状生成の手順として、2次元平面上にて作成した傷口の基本形状を中心に複数のポリラインを並べる。ポリラインを構成する線分の内、傷口に囲われた範囲に存在する線分は範囲外へと移動することで周囲の樹皮の形状を作成した。基本形状を変形して複数生成した樹洞の形状を比較することで、樹洞の特徴をとらえた形状生成が実現できているかを検証した。その結果、傷口が膨らむ様子や樹皮が傷口を迂回する様子を表現できた一方で、基本形状によっては樹木モデルと干渉する問題が判明した。

## 1.2 本論文の構成

本論文は全5章で構成する。第2章では樹洞形状について述べ第3章では提案手法について述べる。第4章では実装結果、検証、考察について述べる。第5章では全体のまとめと今後の課題について述べる。

## 第 2 章

# 樹洞について

樹洞形状を持つ樹木では、傷口周辺に特徴的な形状の変化が生じる。樹洞形状を生成するにあたって、その特徴を考慮する必要がある。

第 1 の特徴として、傷口の周囲が丸く膨らむ特徴がある。これは、樹木は傷によって樹皮の内側に存在する形成層が露出したとき、形成層が細胞分裂をして腐朽に強い癒傷組織を傷口に沿って生成することでできる特徴である [15][16]。癒傷組織が露出した形成層を覆うことで、樹木は傷口を治癒する。この癒傷組織により傷口は丸みのある膨らんだ形状へと変化する。また、癒傷組織は傷口の治療以外に、樹木内部の空洞化した部分が支えていた自重を代わりに支える柱としての機能を持つ。そのため、癒傷組織の太さは全て均等ではなく、地面から垂直な成長方向と平行に近い部分ほど太くなりやすい。図 2.1 は傷口が膨らんだ形状へと変化する様子を模式図で表したものである。成長方向と平行に近い縦長の部分は大きく膨らむが、成長方向と垂直に近い横長の部分はあまり膨らまない。



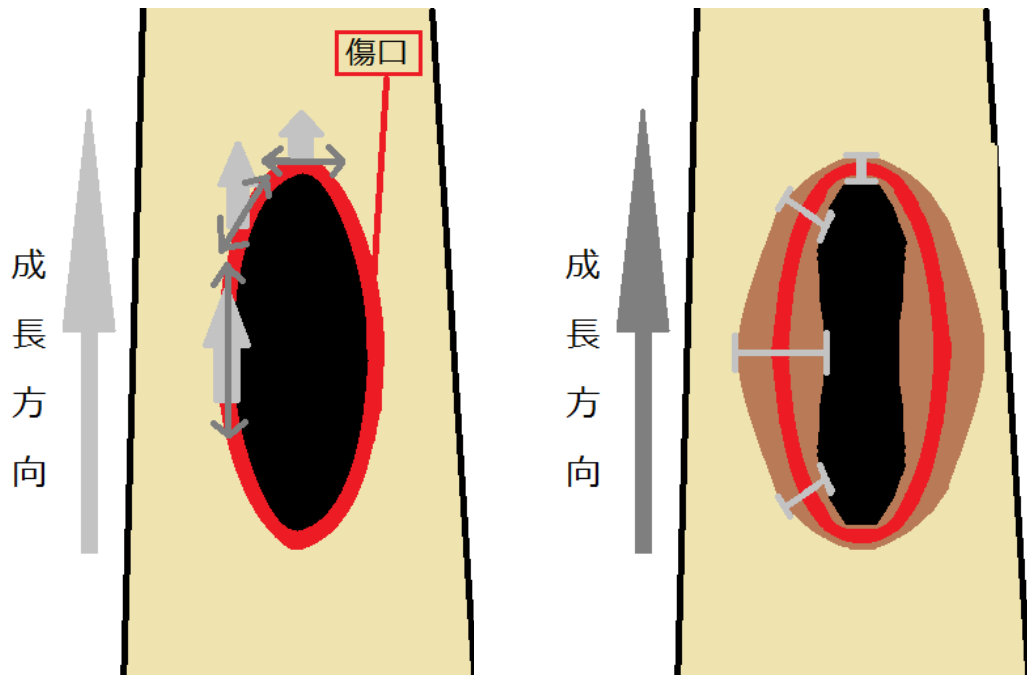


図 2.1: 傷口が癒傷組織によって膨らむ様子

第2の特徴として、癒傷組織は樹皮によって樹木と馴染む特徴がある。形成層が癒傷組織を形成すると、樹木は傷口の周辺に存在する樹皮を癒傷組織に覆い被せる。これは樹木の外側を樹皮で覆うことにより細菌や虫が再度侵入するのを防ぐためであり、その結果として癒傷組織が樹木に馴染む特徴が生じる。図 2.2 は癒傷組織に対して樹皮が覆い被さる様子を模式図で表したものである。

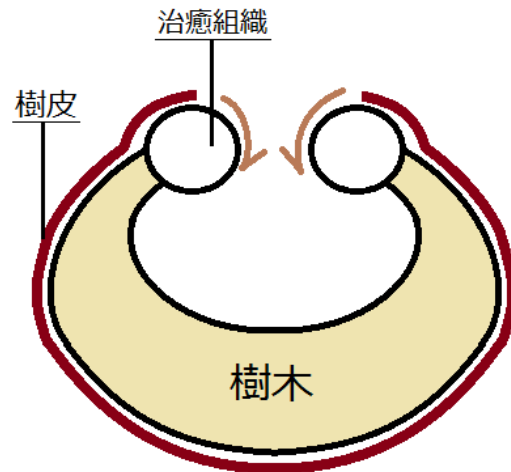


図 2.2: 癒傷組織に樹皮が覆い被さる様子

第3の特徴として、樹木は傷口を避けるように樹皮を生成する特徴がある。樹木に傷口が生じると、樹木はその傷口を避けて迂回するように樹皮を生成する。これは樹木の成長方向に沿っていた導管という水分を根から枝葉へ送る組織が、傷口の上方と下方で分断されてしまったために傷口を迂回して伸びることで生じる。樹木が傷口を迂回して導管を生成した結果、その表面にあたる樹皮も同様に傷口の周囲を迂回する特徴が生じる。図 2.3 は傷口を避けて導管や樹皮を生成している様子を模式図で表したものである。

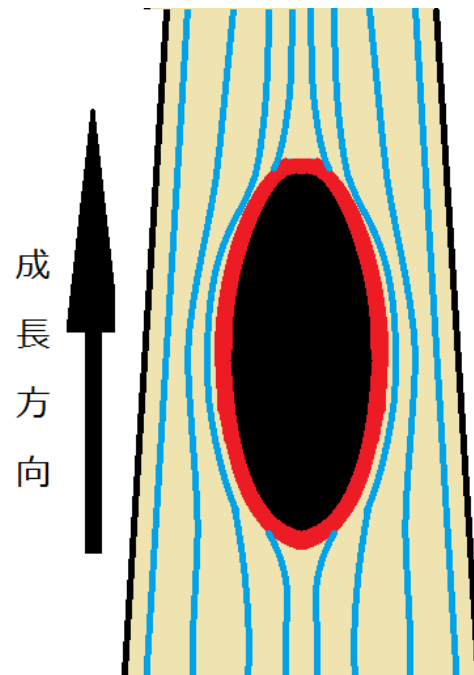


図 2.3: 傷口を迂回する樹皮の様子

本研究では以上の樹洞形状を持つ樹木の特徴を考慮する。

## 第 3 章

# 樹洞形状の生成

本章では、2章で述べた樹洞の特徴を考慮し、樹木モデルに対して3次元形状の樹洞形状を生成する。尚、本研究で扱う樹木モデルはサーフェイスモデルを前提とする。また、本研究において膨らみ形状とは2章で述べた治癒組織を3次元形状で表したものを指し、基本形状とは曲線を分割した頂点から作る線分の集まりによって表すものであり、膨らみ形状をその曲線に沿って生成するための骨格のことを指す。

### 3.1 膨らみ形状の生成

#### 3.1.1 基本形状の生成

膨らみ形状は基本形状である曲線を等間隔に分割し、それらの分割点上で多角形から面をすることで表現する。まず、基本形状を作成する。基本形状はある平面上で作成した後、3次元空間上の樹木モデルの表面に沿わせて膨らみ形状の骨格とする。本研究では、基本形状を作成する平面を標準基底  $e^1, e^2$  を持つベクトル空間として、この平面の横方向の成分を  $x'$ 、縦方向の成分を  $y'$  とする。式 (3.1) は標準基底  $e^1, e^2$  の各成分を示す。

$$e^1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} e^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

また、樹木モデルが存在する3次元空間は右手系の座標空間とする。現実の樹洞において、治癒組織は傷口の形状によって曲がりくねった環状の構造になることが多い。そこで本研究では基本形状を指定する曲線に5次のBézier曲線[17]を用いた。Bézier曲線は制御点を $\mathbf{P}_0, \mathbf{P}_1, \dots, \mathbf{P}_5$ としたとき、式(3.2)となる。

$$\mathbf{K}(t) = \sum_{i=0}^5 B_i^5(t) \mathbf{P}_i \quad (3.2)$$

ここで、 $B_i^5(t)$ はBernstein基底関数と呼ぶ関数で、式(3.3)で表される。

$$B_i^5(t) = \binom{5}{i} t^i (1-t)^{5-i} \quad (3.3)$$

$t$ の値が0から1の間を変化することで点 $\mathbf{P}(t)$ が連続的に変化する。

本研究では基本形状を2つのBézier曲線を用いて、それぞれの始点と終点を繋げた環状を膨らみ形状の基本形状とする。5次のBézier曲線は6つの制御点を持ち、一方の曲線における制御点の始点を $\mathbf{P}_0$ として終点を $\mathbf{P}_5$ とする。また、もう一方のBézier曲線の制御点を $\mathbf{P}'_0, \mathbf{P}'_1, \dots, \mathbf{P}'_5$ として始点を $\mathbf{P}'_0$ とし、終点を $\mathbf{P}'_5$ としたとき、それぞれの制御点の初期位置は4以上で樹木モデルの $x$ 成分の長さ以内となる値 $W$ と4以上で樹木モデルの $y$ 成分の長さ以内となる値 $H$ を用いて式(3.4)、(3.5)で表される。

$$\mathbf{P}_i = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0, -\frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i=0 \text{ のとき}) \\ \begin{pmatrix} \frac{W}{4}, -\frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i=1 \text{ のとき}) \\ \begin{pmatrix} \frac{W}{2}, (i-1) \left( \frac{H}{4} \right) - \frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i=2, i=3 \text{ のとき}) \\ \begin{pmatrix} \frac{W}{4}, \frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i=4 \text{ のとき}) \\ \begin{pmatrix} 0, \frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i=5 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{P}'_i = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0, -\frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i = 0 \text{ のとき}) \\ \begin{pmatrix} -\frac{W}{4}, -\frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i = 1 \text{ のとき}) \\ \begin{pmatrix} -\frac{W}{2}, (i-1) \left( \frac{H}{4} \right) - \frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i = 2, i = 3 \text{ のとき}) \\ \begin{pmatrix} -\frac{W}{4}, \frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i = 4 \text{ のとき}) \\ \begin{pmatrix} 0, \frac{H}{2} \end{pmatrix} & (i = 5 \text{ のとき}) \end{cases} \quad (3.5)$$

ここで、 $\mathbf{P}_1$  と  $\mathbf{P}_4$  の  $y'$  成分は  $\mathbf{P}_0$  と  $\mathbf{P}_5$  の  $y'$  成分と同じ値にする。これはもう一方の Bézier 曲線の始点、終点と滑らかに接続するためには  $\mathbf{P}_0$  と  $\mathbf{P}_1$ 、 $\mathbf{P}_4$  と  $\mathbf{P}_5$  を結ぶ直線の傾きが、それぞれもう一方の Bézier 曲線の  $\mathbf{P}'_0$  と  $\mathbf{P}'_1$ 、 $\mathbf{P}'_4$  と  $\mathbf{P}'_5$  を結ぶ直線の傾きと等しくなる必要があるためである。そうして制御点の位置を決定した後、式 (3.2) に対して  $t$  の値を 0 から始めて、式 (3.6) で得た値  $u_{(t)}$  を  $t$  に対して値が 1 以上になるまで増加した結果を、膨らみ形状を構成する多角形を配置するための基本形状上の頂点  $\mathbf{V}_1$ 、 $\mathbf{V}_2$ 、 $\dots$ 、 $\mathbf{V}_\gamma$  とする。 $\gamma$  は  $t$  に  $u_{(t)}$  を加えた回数に 1 を足したものとする。

$$u_{(t)} = \frac{1}{10 \left| \sum_{i=0}^4 B_i^4(i) (\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{i-1}) \right|} \quad (3.6)$$

そうして作成した基本形状を樹木モデルの表面に沿うように配置する。まず、樹木モデルを貫通する任意の直線  $L$  を指定する。直線  $L$  と樹木モデルが交差する点の 1 つを点  $\mathbf{A}$  とし、点  $\mathbf{A}$  ともう 1 つの交差する点との中点を  $\mathbf{B}$  とする。次に、平面上で作成した基本形状を樹木モデルの存在する 3 次元空間に変換する。平面空間の各成分  $x'$ 、 $y'$  は式 (3.7) を用いて 3 次元空間座標に変換する。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

そして直線  $L$  に対して平面が垂直となるように平面の法線と直線  $L$  に垂直なベクトルを軸として回転を加えた後、平面における原点を樹木モデル上の点  $A$  に合わせる。A-B 方向のベクトルを  $\mathbf{a}$ 、平面の法線ベクトルを  $\tau$  として、 $\mathbf{a}$  と  $\tau$  のなす角を  $\Theta$  とする。 $\mathbf{a}$  と  $\tau$  に垂直な回転軸をベクトル  $\phi$  として、基本形状上の頂点の 1 つを  $\mathbf{V}_j$  とした時、回転後の頂点  $\mathbf{V}'_j$  は式 (3.8) で求める。

$$\begin{aligned}\mathbf{V}'_j &= Q(\Theta, \phi) \mathbf{V}_j \\ \phi &= \mathbf{a} \times \tau \\ \Theta &= \arccos\left(\frac{\mathbf{a} \cdot \tau}{|\mathbf{a}| |\tau|}\right)\end{aligned}\quad (3.8)$$

ここで、 $Q$  は四元数 [18] を表し、“ $\times$ ” は外積記号を表す。その後、点  $B$  と基本形状上の各頂点をそれぞれ結ぶ線分が、樹木モデルと干渉する位置に基本形状上の各頂点を移動することで基本形状を樹木モデルに沿わせる。

### 3.1.2 膨らみ形状の形状設定

樹木モデルに沿わせた基本形状上の各頂点を元に膨らみ形状を構成する多角形を作成する。ここでは基本形状上の頂点の 1 つを  $\mathbf{V}_j$  として、 $\mathbf{V}_j$  を元に作成する任意の角数  $M$  を持つ多角形を  $C_j$  とする。また、多角形  $C_j$  を構成する頂点を  $\mathbf{N}_1^j$ 、 $\mathbf{N}_2^j$ 、 $\dots$ 、 $\mathbf{N}_M^j$  とする。多角形  $C_j$  を構成する頂点の 1 つを  $\mathbf{N}_m^j$  として、 $\mathbf{N}_m^j$  は基本形状上の頂点  $\mathbf{V}_j$  を中心に回転することで得る。回転する軸は  $\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_{j+1}$  方向のベクトル  $\mathbf{F}_j$  とする。回転する角度  $\theta_m$  は  $\frac{360^\circ}{M}$  に、凹凸をつけるため各頂点毎に  $-5^\circ$  から  $5^\circ$  の範囲でランダムな値  $c_m$  を加えたものとする。また、各頂点の回転角度に加えた値  $c_1, c_2, \dots, c_M$  の合計は 0 となるようにして、 $\theta_m$  の角度は  $\theta_{m-1}$  を下回らないものとする。回転する半径  $R_m$  は常に 1 以上かつ  $\frac{W}{4}$  以内で任意の入力値  $r$  に対して、各頂点毎に凹凸をつけるため 0.9 から 1.1 の範囲でランダムな値を乗算した値に、各  $C_j$  毎に膨張量  $E_j$  を加算したものとする。膨張量  $E_j$  は成長方向に平行な治癒組織が膨らみやすい様子を表現するための値で、 $\mathbf{F}_j$  とその前後のベクトル  $\mathbf{F}_{j-1}$ 、 $\mathbf{F}_{j+1}$  の 3 つをそれぞれ  $y$  軸方向のベクトルと内積して得た値の平均に

任意の入力値  $I$  を乗算したものと式 (3.9) で求める。

$$E_j = I \frac{((\mathbf{F}_{j-1} \cdot \mathbf{y}) + (\mathbf{F}_j \cdot \mathbf{y}) + (\mathbf{F}_{j+1} \cdot \mathbf{y}))}{3}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

ここで、 $\cdot$  は内積記号を表す。また、数値  $I$  の範囲は式 (3.10) とする。

$$0 \leq I \leq \frac{W}{4} - r \quad (3.10)$$

また、回転する角度と半径に対してランダムな数値を加えて凹凸をつける計算は田中 [19] の手法を参考にした。式 (3.11) は  $C_j$  を構成する頂点  $\mathbf{N}_m^j$  を求める式である。

$$\mathbf{N}_m^j = Q(\theta_m, \mathbf{F}_j) \mathbf{T}_j R_m + \mathbf{V}_j$$

$$\theta_m = m \frac{360^\circ}{M} + c_m \quad (3.11)$$

$$R_m = ra + E_j$$

ここで、 $Q$  は四元数を表し、 $\mathbf{F}_j$  を回転軸として方向ベクトル  $\mathbf{T}_j$  を角度  $\theta_m$  だけ回転する。 $\mathbf{T}_j$  は方向ベクトルであり、ここでは直線  $L$  と  $\mathbf{F}_j$  の外積から得た方向ベクトルを正規化して得た単位ベクトルとする。図 3.1 は  $M$  角形  $C_j$  を構成している頂点  $\mathbf{N}_m^j$  の位置を示している。



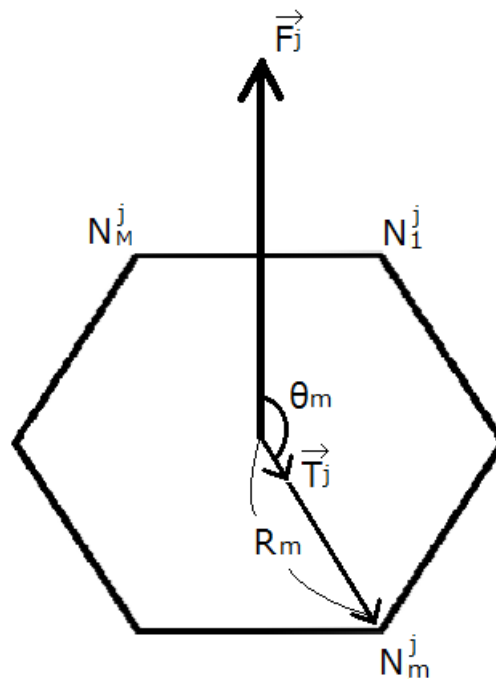


図 3.1:  $M$  角形を構成する頂点配置

以上により全ての基本形状上の頂点において膨らみ形状を構成する多角形を作成したら、多角形同士を3角形で面を貼る。

## 3.2 樹木が傷口周辺を避けて樹皮を生成する様子の表現

### 3.2.1 樹皮形状の設定

樹皮が傷口を避ける様子については、膨らみ形状の基本形状と同じく  $x'y'$  平面上で複数のポリラインを樹皮に見立てて設定した後、樹木モデルに沿わせることで生成する。

まず、樹皮に見立てたポリライン (以下、樹皮線) の設定について説明する。樹皮線は式 (3.4) で用いた  $H$  の2倍を長さとして、分割数  $\beta$  を持つポリラインとし

て定義する。 $\beta$ は樹皮線の高さを任意の分割間隔 $q$ で除算した値の少数点を切り捨てたものとする。この樹皮線を式(3.4)で用いた $W$ の2倍の範囲で等間隔 $l$ に並べる。よって樹皮線の本数 $\alpha$ は $W$ を2倍した数値を間隔 $l$ で除算した値になる。樹皮線を構成する頂点毎に、 $x'$ 成分が小さい樹皮線上の $y'$ 成分が小さい頂点から順に要素番号 $(1,1)$ 、 $(1,2)$ 、 $\dots$ 、 $(2,1)$ 、 $(2,2)$ 、 $\dots$ 、 $(\alpha,\beta+1)$ を割り当てる。要素番号 $(g,h)$ の樹皮線を構成する頂点を $\mathbf{b}^{g,h}$ として、頂点の位置を式(3.12)によって決定する。

$$\begin{aligned} \mathbf{b}^{g,h} &= (gl - W, hq + H) \\ g &= 1, 2, \dots, \alpha \\ h &= 1, 2, \dots, \beta + 1 \end{aligned} \tag{3.12}$$

図3.2は式(3.12)によって基本形状の周囲に樹皮線を並べた様子を示している。

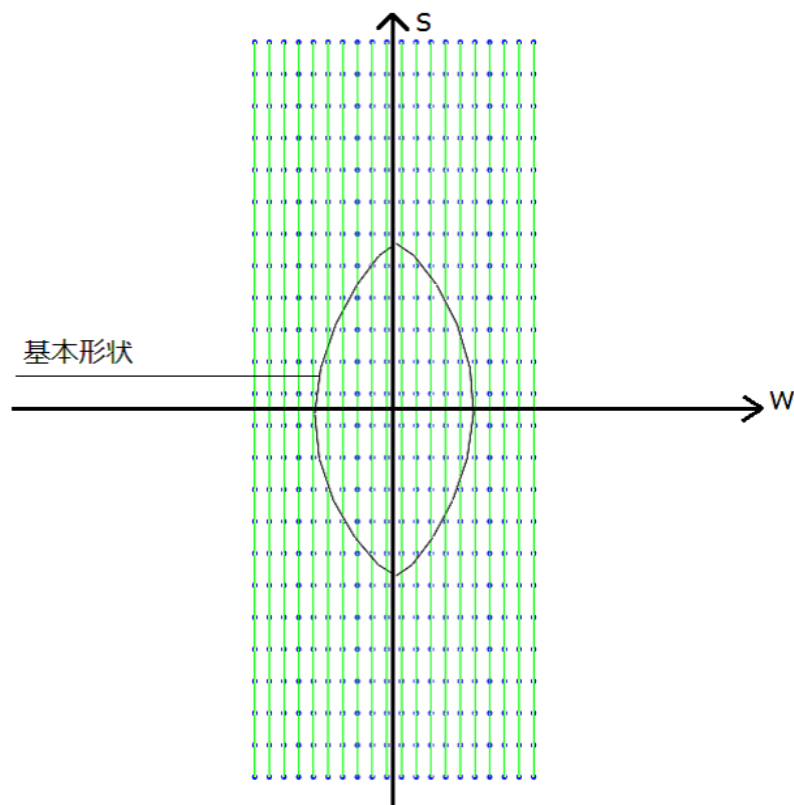


図 3.2: 基本形状を中心として樹皮線を並べた様子

次に、基本形状の周囲に並べた樹皮線を基本形状を避けるように変形する。こ

ここで、基本形状上の頂点で最も  $y'$  成分の大きい頂点を樹皮の分かれ目  $V'_j$  として、 $V'_j$  より  $x'$  成分が小さく  $V'_j$  に最も近い樹皮線の要素番号を  $(v, h)$  で表す。樹皮線上の頂点が基本形状で囲んだ範囲内に存在した場合、範囲外へと移動する。要素番号  $(g, h)$  の  $g$  が  $v$  以下となる樹皮線上の頂点を以下、左流れの樹皮線上の頂点とし、要素番号  $(g, h)$  の  $g$  が  $v$  以降となる樹皮線上の頂点を以下、右流れの樹皮線上の頂点とする。樹皮線上の頂点が移動する位置については、 $w$  軸に平行で樹皮線上の頂点の  $y'$  成分を持つ直線と基本形状の交点の中で、左流れの樹皮線上の頂点の場合は、 $V'_j$  より  $x'$  成分が小さい交点を移動する位置として、右流れの樹皮線上の頂点の場合は、 $V'_j$  より  $x'$  成分が大きい交点を移動する位置とする。図 3.3 は基本形状で囲んだ範囲の中に存在した樹皮線を囲んだ範囲の外に移動した様子を示している。

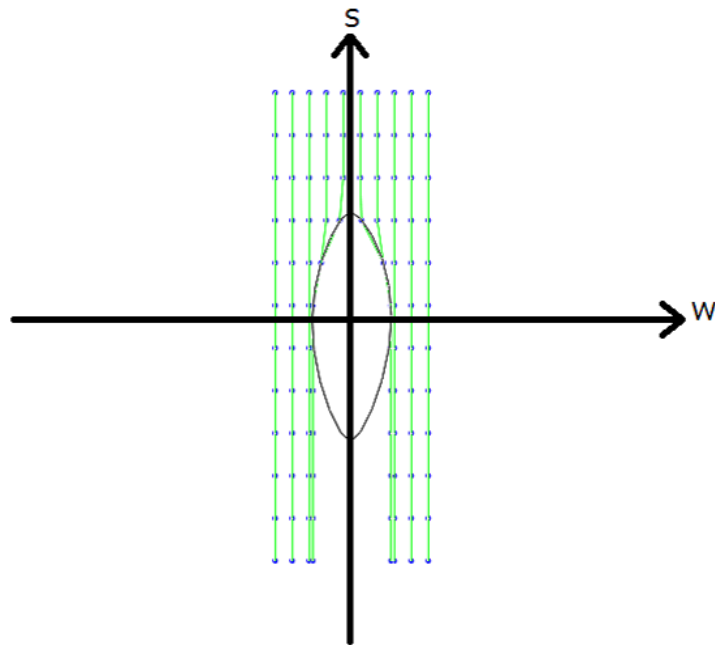


図 3.3: 樹皮線を基本形状の外に移動した様子

その後、樹皮線上の頂点毎に樹皮線が基本形状を避けることにより外側の樹皮線を押し広げるときの  $x'$  成分の移動量  $\mathbf{J}$  を式 (3.13) で求める。

$$\mathbf{J} = 2r(l - |\mathbf{D}| - f)d \quad (3.13)$$

ここで、 $l$  ははじめに樹皮線を並べたときの間隔を表す。 $\mathbf{D}$  は左流れの樹皮線上の頂点の場合は  $\mathbf{b}^{g+1,h}$  から  $\mathbf{b}^{g,h}$  へ方向ベクトルとして、右流れの樹皮線上の頂点の場合は  $\mathbf{b}^{g-1,h}$  から  $\mathbf{b}^{g,h}$  へ方向ベクトルとする。 $d$  は  $x'$  軸において移動する方向を表す。左流れの樹皮線上の頂点の場合は  $d$  の値を  $-1$  とし、右流れの樹皮線上の頂点の場合は  $d$  の値を  $1$  とする。 $f$  は減衰率を表し、要素番号  $(g, h)$  の樹皮線上の頂点における値は式 (3.14) で求める。ただし、減衰率  $f$  は樹皮線が押し広げる移動量を超えないこととする。

$$f = \begin{cases} (2rg')^2 & ((2rg')^2 < l - |\mathbf{D}|) \\ l - |\mathbf{D}| & ((2rg')^2 > l - |\mathbf{D}|) \end{cases} \quad (3.14)$$

ここで、 $g'$  の値は式 (3.15) で求める。

$$g' = \begin{cases} g & (g \leq v) \\ g - v & (g > v) \end{cases} \quad (3.15)$$

また、左流れの樹皮線上の頂点の場合は要素番号  $(g, h)$  と要素番号  $(g + 1, h)$  の樹皮線上の頂点、右流れの樹皮線上の頂点の場合は要素番号  $(g, h)$  と  $(g - 1, h)$  の樹皮線上の頂点の距離が  $l$  以上離れている場合、押し広げられた樹皮が元に戻ろうとする様子を移動量を  $\mathbf{U}$  として式 (3.16) で求めた。

$$\mathbf{U} = \begin{cases} (2r - f)d & (b^{g,h} - (2r - f) > b^{g,h} + l \text{ のとき}) \\ (|\mathbf{D}| - l + f)d & (b^{g,h} - (2r - f) < b^{g,h} + l \text{ のとき}) \end{cases} \quad (3.16)$$

図 3.3 は式 (3.13)、(3.16) によって樹皮線を押し広げた様子である。

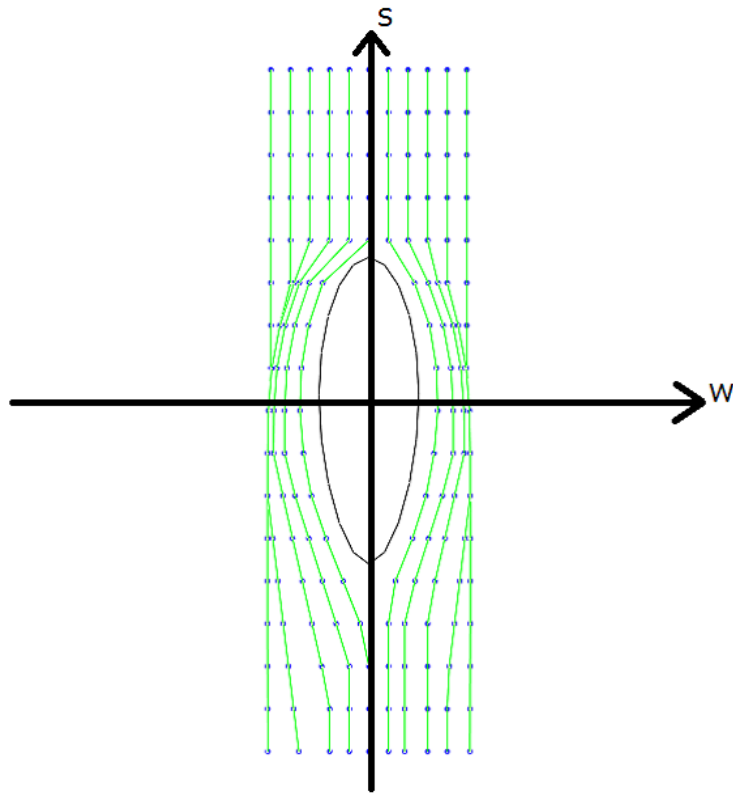


図 3.4: 樹皮線を押し広げた様子

### 3.2.2 樹皮形状の作成

樹皮線の移動が済んだら、基本形状との面の設定を行う。要素番号  $(v, h)$ 、または  $(v + 1, h)$  となる樹皮線上の頂点を持つ樹皮線は基本形状上の各頂点と、左流れ、または右流れの樹皮線上の頂点はそれぞれ  $g + 1$ 、または  $g - 1$  となる樹皮線上の頂点を持つ樹皮線とで面の設定を行う。要素番号  $(v, h)$ 、または  $(v + 1, h)$  となる樹皮線上の頂点を持つ樹皮線と基本形状上の各頂点との面の設定については、基本形状上の頂点の1つを  $\mathbf{V}_j$ 、 $\mathbf{V}_j$  から  $\mathbf{V}_{j+1}$  方向のベクトル  $\mathbf{F}_j$  に対して垂直なベクトルを  $\mathbf{T}_j$  として、ベクトル  $\mathbf{T}_j$  と樹皮線の交点を新たに頂点  $\mathbf{k}_j$  として作成することで面の接続関係を設定する。このとき、作成した頂点  $\mathbf{k}_j$  と  $\mathbf{k}_{j+1}$  の間に樹皮線上の頂点が存在する場合、 $\mathbf{b}^{g,h}$ 、 $\mathbf{k}_j$ 、 $\mathbf{k}_{j+1}$ 、 $\mathbf{V}_j$ 、 $\mathbf{V}_{j+1}$  の5つの頂点から3つの三

角形の平面を設定する。それぞれの三角形を  $s_1$ 、 $s_2$ 、 $s_3$  としたときの接続関係を式 (3.17) に示す。また、図 3.5 は 5 つの頂点が式 (3.17) の接続関係を持った様子である。

$$\begin{aligned}
 s_1 &= (\mathbf{k}_j, \mathbf{V}_j, \mathbf{b}^{g,h}) \\
 s_2 &= (\mathbf{V}_j, \mathbf{V}_{j+1}, \mathbf{b}^{g,h}) \\
 s_3 &= (\mathbf{b}^{g,h}, \mathbf{V}_{j+1}, \mathbf{k}_{j+1})
 \end{aligned}
 \tag{3.17}$$

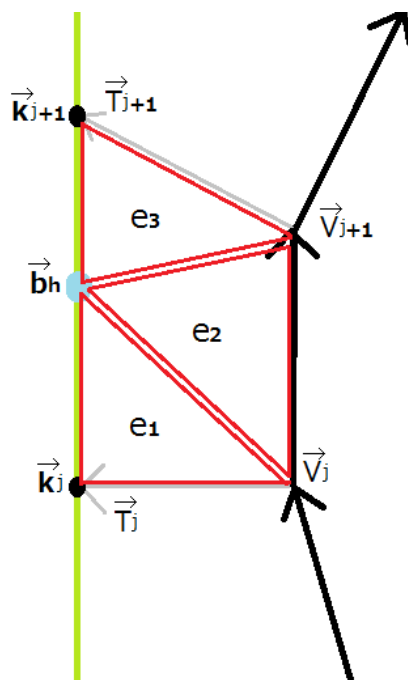


図 3.5: 樹皮線と基本形状の接続関係

また、要素番号  $(v, h)$  となる樹皮線上の頂点と要素番号  $(v + 1, h)$  となる樹皮線上の頂点の内、基本形状上で  $y'$  成分が最大となる頂点を  $\mathbf{V}_j$  として、 $\mathbf{V}_j$  以上の  $y'$  成分を持ち  $\mathbf{V}_j$  に最も近い点同士を線分で結ぶ。基本形状上の各線分に垂直なベクトルがこの線分と交差する場合は、その交点を新たな頂点として作成する。同様に、要素番号  $(v, h)$  となる樹皮線上の頂点と要素番号  $(v + 1, h)$  となる樹皮線上の頂点の内、基本形状上で  $y'$  成分が最小となる頂点を  $\mathbf{V}'_j$  として、 $\mathbf{V}'_j$  以下の  $y'$  成分を持ち  $\mathbf{V}_j$  に最も近い点同士を線分で結ぶ。図 3.6 は  $y'$  成分が最大となる基本形状

上の頂点を  $\mathbf{V}_j$  として、要素番号  $(v, h)$  となる樹皮線上の頂点と要素番号  $(v + 1, h)$  となる樹皮線上の頂点の中で  $\mathbf{V}_j$  以上の  $y'$  成分を持ち  $\mathbf{V}_j$  に最も近い点  $\mathbf{b}^{g,h}$ 、 $\mathbf{b}^{g+1,h}$  を線分で結んだ様子を示し、図 3.7 はこれらの接続関係を全体に適用した様子を表したものである。

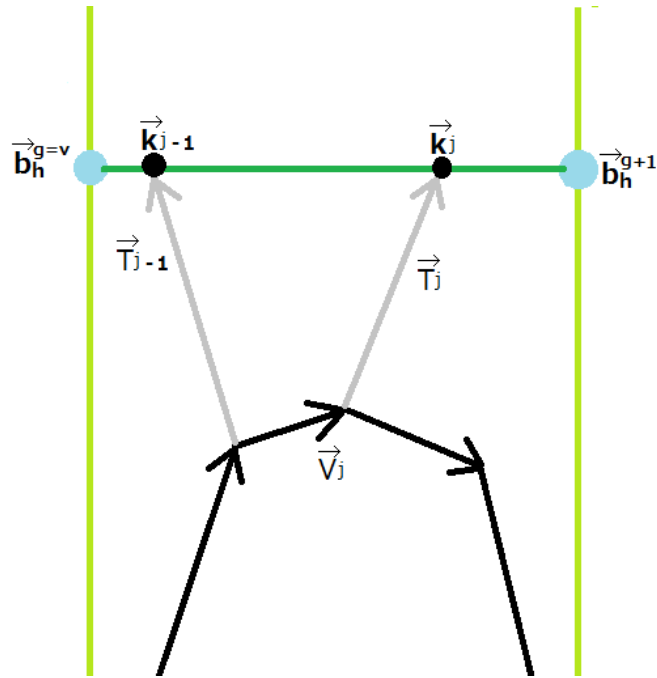


図 3.6: 基本形状以上の  $s$  成分を持つ点  $\mathbf{b}^{g,h}$  と  $\mathbf{b}^{g+1,h}\mathbf{V}_j$  を結ぶ線分

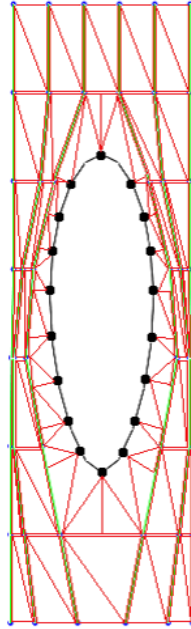


図 3.7: 樹皮線と基本形状の接続の様子

樹皮線の変形と接続関係の設定を終えたら、樹皮線を基本形状と同様にして樹木モデルの存在する 3次元空間へ変換する。そして、基本形状と同様に樹木モデル内部の点  $\mathbf{B}$  から樹皮線上の各頂点、樹皮線上に新たに作成した各頂点へと伸ばすベクトルが、樹木モデルと干渉する位置にそれぞれの頂点を移動する。このとき、傷口に近い樹皮は盛り上がることを考慮してそれぞれの頂点を移動する。各樹皮線上の頂点は最も近い基本形状上の頂点との距離に応じて樹木モデル内部の点  $\mathbf{B}$  から各頂点へ伸ばしたベクトル方向へ移動する。要素番号  $(g, h)$  の樹皮線上の頂点を  $\mathbf{b}^{g,h}$ 、基本形状上の 1つの頂点を  $\mathbf{V}_j$ 、樹木モデル内部の点  $\mathbf{B}$  から樹皮線上の頂点へと伸ばしたベクトルを  $\mathbf{S}_j$ 、 $\mathbf{V}_j$  を元に作成した多角形を構成する各頂点の半径の基準値を  $r$ 、 $\mathbf{V}_j$  を元に作成した多角形を構成する各頂点の半径の平均値を  $R_j$  として、式 (3.18) により樹木モデル上の位置から  $\mathbf{b}^{g,h}$ 、 $\mathbf{k}_j$  を移動させる式を



表す。式 (3.18) は樹木モデル上の位置から樹皮線上の頂点を移動する。

$$\mathbf{b}^{g,h} = R_j \frac{2r}{|\mathbf{V}_j - \mathbf{b}^{g,h}|} \frac{\mathbf{S}_j}{|\mathbf{S}_j|} \quad (3.18)$$

$|\mathbf{V}_j - \mathbf{b}^{g,h}|$  は  $\mathbf{b}^{g,h}$  から  $\mathbf{V}_j$  への距離である。

最後に、式 (3.17) で設定した樹皮と基本形状との接続関係について、基本形状上の頂点を設定した点については、樹皮線上の各頂点、樹皮線上に新たに作成した各頂点から最も近い多角形を構成する頂点に変更し、それぞれの頂点に面を貼る。

このように、膨らみ形状に対して樹皮線を接合することで膨らみ形状が樹木モデルに馴染む様子を表現した。

# 第 4 章

## 検証と考察

### 4.1 検証

3章で述べた手法を、3D グラフィックツールキットである Fine Kernel ToolKit System[20] を用いて実装した。。図 4.1 では基本形状によって膨らみ形状の太さの変化量を比較した。垂直方向を向く部分程太くなることが確認できた。

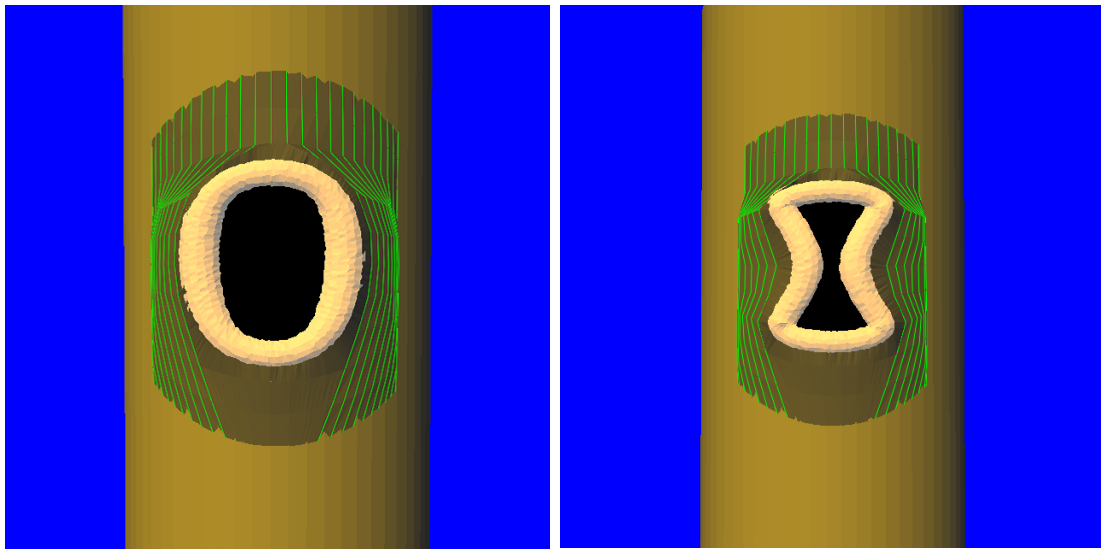


図 4.1: 基本形状による膨らみ形状の太さの変化

図 4.2 では基本形状によって樹皮が傷口を迂回する様子を比較した。傷口により押し広がった後に元の位置へ戻ろうとする様子が確認できた。

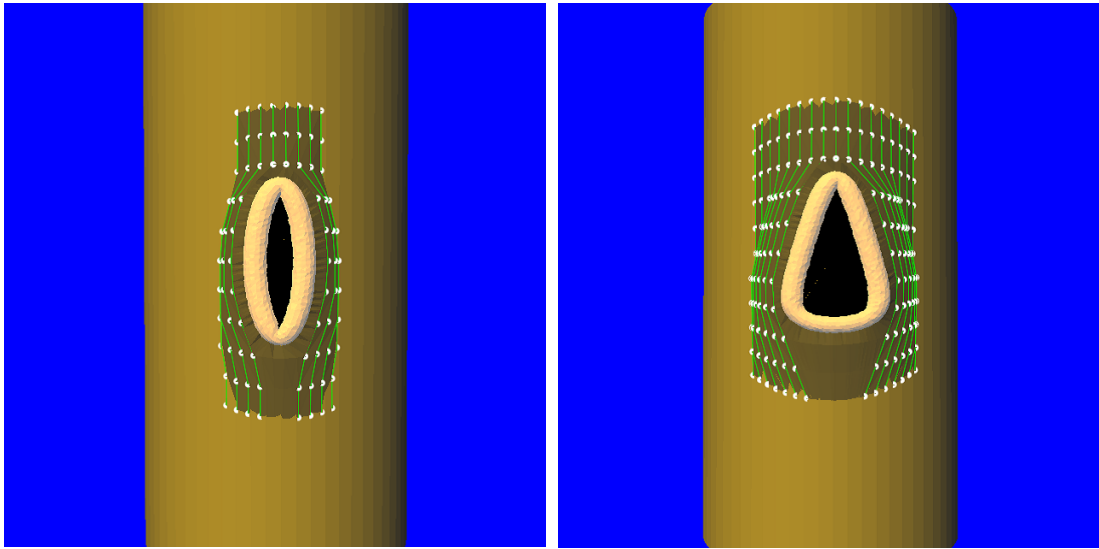


図 4.2: 基本形状により樹皮が迂回する様子

図 4.3 は樹皮が膨らみ形状を覆う様子である。

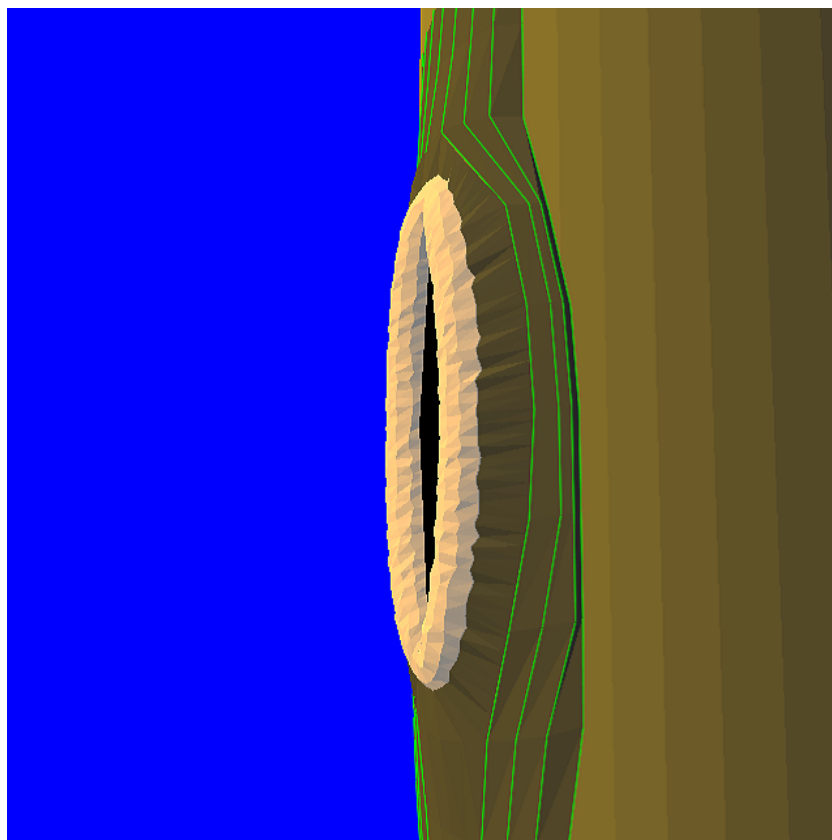


図 4.3: 膨らみ形状を覆う樹皮

図 4.3 は樹木モデルに対して形状生成を行った結果である。

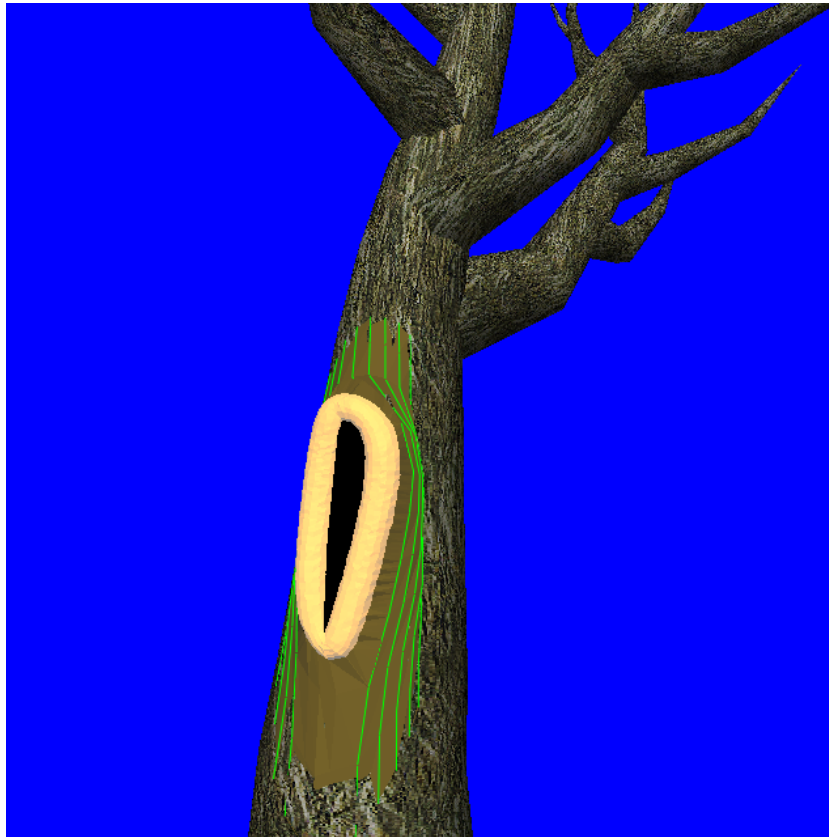


図 4.4: 樹木モデルへの形状生成

## 4.2 考察

本研究で実現できた樹洞形状の特徴を下記に述べる。膨らみ形状については垂直方向に伸びている部分が膨らむという点を実現できた。また、周囲の樹皮についても基本形状との位置によって押し広がる様子や広がった樹皮が元の位置に戻ろうとする様子の他、膨らみ形状と樹皮が接合する様子を実現できた。しかし、以下の問題点が挙げられる。

- 作成できる樹洞形状の大きさの制限

本研究では、基本形状を平面空間で設定してから視点の向きに合わせて回転させた後、樹木モデルと基本形状上の各頂点を線で結び移動している。しか

し、平面上で基本形状の設定を行うため、樹木モデルの半周を超える大きさの樹洞形状を作成することはできない。現実の樹洞には幹から折れた樹木に対して幹を1週するようにして樹洞形状ができることがあり、これを考慮する必要がある。

- 膨らみ形状の太さ

本研究では膨らみ形状の太さを、垂直方向との角度によって増加した。しかし、太さを過剰に増加するとある  $M$  角形  $C_j$  とその前後の  $C_j$  が交差してしまい、正常に面を貼ることができなくなる。正常な形状の生成を行うために、これらの交差を管理する必要がある。この問題は基本形状を細長くする程顕著に表れる。

- 樹皮形状の面と樹木モデルの干渉

本手法により作成した樹皮形状は、樹皮線間を直線で結ぶことで面を作成している。そのため、樹皮線間で樹木モデルが大きく凸形状となる場合は樹皮形状と樹木モデルが干渉してしまう。これを回避するため、樹皮形状の面を細かく分割して対応する必要がある。

- 作成できる樹洞形状の限定

本研究では、樹木上のある程度高い位置に対して樹洞形状の生成を行った。しかし、現実の樹洞形状の中には樹木の根元からできるものがある。この形状の場合、治癒組織の太さは根の太さに影響を受けるため、この方法では形状の特徴を完全には再現できない。根元からできる樹洞に対して、個別に膨らみ形状の太さを考慮する必要がある。また、現実の樹洞には幹から折れた樹木に対して幹を1週するようにして樹洞形状ができることがあるが、そのような樹洞形状は樹皮の流れに対して垂直である。なので樹皮は迂回せずほぼ真っ直ぐ傷口に向かって生成するが、本手法ではこの様子を再現できない。この場合も個別に樹皮の流れについて考慮する必要がある。

## 第 5 章

### まとめ

本研究では、自然現象を考慮した樹洞形状を簡易に生成するモデリングシステムを提案した。既存の樹木モデルに対して、傷口の形状に応じて治癒組織の太さや樹皮の流れ方を考慮して樹洞形状を生成することを目的とした。傷口の形状は Bézier 曲線で設定した。その曲線をサンプリングして得た点に乱数値や点と次の点から得た向きによって変化する多角形を配置して、それらの多角形から治癒組織の形状を作成した。樹皮形状はポリラインを複数用意して、傷口形状や近辺のポリラインと距離を置くようにポリラインを構成する頂点を移動し、ポリラインの各頂点から樹皮形状を作成した。生成した樹洞形状は、地面から垂直に近い癒傷組織が大きく膨らむ特徴や樹皮が傷口を迂回する特徴を考慮している。しかし、樹皮形状と樹木モデルの接合に関しては干渉が発生した。主な要因としては、樹皮形状の作成に用いた複数のポリラインをそれぞれ線分で結んだため、ポリライン間で樹木モデルが凸形状となった場合に対応できないことが挙げられる。ポリライン間で樹木モデルと干渉判定を取り、場合によって樹皮形状の面を分割して適応すれば、より実用的になると考える。

また、膨らみ形状を樹木モデル内の指定した点へと射影することで樹木モデルに膨らみ形状を沿わせたが、この方法では基本形状と樹木モデル上に生成される膨らみ形状の大きさに差ができてしまう問題があった。これらの問題を解消することでより自然現象を考慮した樹洞形状の作成が行えるだろう。

# 謝辞

本研究を進めるにあたって、時に厳しく時に寛容にご指導いただきました渡辺大地講師をはじめ、三上浩司講師、竹内亮太様、阿部雅樹様、各院生の皆様、そして苦楽を共にした学部生の皆様に深く感謝します。本当に、本当にありがとうございました。



## 参考文献

- [1] 金丸直義, 千葉則茂, 高橋清明, 斎藤伸自. 向日性による樹木の自然な枝振りのCGシミュレーション. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理 = The transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. 75, No. 1, pp. 76–85, 1992.
- [2] 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研究会報告, Vol. 2003, No. 86, pp. 41–46, 2003.
- [3] 大志田憲, 村岡一信, 千葉則茂. 樹木のCGのための地上部-地下部間の相互作用を考慮した統合的成長モデル. 全国大会講演論文集, No. 2, pp. 113–120, 1999.
- [4] 進藤亜梨, 坂本雄児. 吸盤の働きを考慮したツタのCGモデル生成手法. 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 34, No. 6, pp. 233–238, 2010.
- [5] Zhuming Lam and Scott A. King. Simulating tree growth based on internal and environmental factors. In *GRAPHITE '05: Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*, GRAPHITE '05, pp. 99–107, 2005.

- [6] Yotam Livny, Soeren Pirk, Zhanglin Cheng, Feilong Yan, Oliver Deussen, Daniel Cohen-Or, and Baoquan Chen. Texture-lobes for tree modelling. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 30, pp. 53:1–53:10, 2011.
- [7] Peter E. Oppenheimer. Real time design and animation of fractal plants and trees. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, Vol. 20, pp. 55–64, August 1986.
- [8] 桑原教彰, 志和新一, 鉄谷信二, 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成方法. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol. 78, No. 7, pp. 1091–1104, 1995-07-25.
- [9] 望月茂徳, 堀江大輔, 蔡東生. 紅葉のフラクタルシェーディングに関する研究. 芸術学会論文誌, Vol. 6, No. 2, pp. 76–87, 2007.
- [10] 巽二郎. 根の形態測定法 : フラクタル解析の利用 (作物の形態研究法 : マクロからミクロまで, 連載ミニレビュー). 日本作物学会紀事, Vol. 76, No. 4, pp. 604–609, 2007-10-05.
- [11] Sylvain Lefebvre and Fabrice Neyret. Synthesizing bark. *EGRW '02 Proceedings of the 13th Eurographics workshop on Rendering*, pp. 105–116, 2002.
- [12] 広田光一, 加藤弘和, 金子豊久. 成長を考慮した樹皮のcgモデル. 情報処理学会論文誌, Vol. 39, No. 11, pp. 3027–3034, 1998-11-15.
- [13] 齊藤寛明. 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] ～field note～ 野生動物などの写真館.  
<http://montry.exblog.jp/9939679/>.
- [15] 安盛博. 樹木医ハンドブック, pp. 62–79. 株式会社牧野, 1992.

- [16] 京都大学木質科学研究所（編）. 木のひみつ, pp. 9–17. 東京書籍株式会社, 1994.
- [17] 鳥谷浩志, 千代倉弘明. 3次元CADの基礎と応用, pp. 43–48. 共立出版株式会社, 1991.
- [18] 金谷一郎. 3D-CG プログラマーのためのクォータニオン入門. 株式会社工学社, 2004.
- [19] 田中美穂. 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. 東京工科大学学士論文, 2008.
- [20] Fine Kernel Project. Fine Kernel ToolKit System.  
<http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.