

2009年度 卒業論文

ヤエヤマヒルギの  
支柱根の自動生成について

指導教員：渡辺 大地 講師，三上 浩司 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 M0106222

佐藤 成樹

**2009年度 卒業論文概要**

**論文題目**

ヤエヤマヒルギの  
支柱根の自動生成について

**メディア学部**

学籍番号：M0106222

**氏名**

佐藤 成樹

**指導  
教員**

渡辺 大地 講師  
三上 浩司 講師

**キーワード**

3DCG、自動生成、モデリング、  
ヤエヤマヒルギ、支柱根

3次元コンピュータグラフィックスの分野では、対象物をリアルに描くことが求められている。また、自然の風景をコンピュータで描画する際に多くの草木の3次元モデルを必要とする。草木をコンピュータグラフィックスでリアルに見せるためには、草木の特徴を捉えたユニークなモデルを多数配置する必要がある。近年では、草木モデリング生成の効率化のため、幹や枝葉の形状を自動的に生成する研究が盛んであるが、根に注目したものは少ない。

熱帯に生息するマングローブ植物の多くは根を地表に出すことが多く、構造が独特かつ複雑なため、モデリングの際は労力を必要とする。根に関する既存研究では地中の根に関するものが多く、根を地表に出す特徴を持つマングローブ根の自動生成はできていない。

そこで本研究では、代表的なマングローブ植物であるヤエヤマヒルギに注目し、ヤエヤマヒルギ特有の支柱根とよばれる根の3次元形状を自動生成する手法を提案する。本研究ではヤエヤマヒルギの生態的特徴と形状的特徴を考慮した自動生成を行った。支柱根の形状を懸垂線を用いることで、力学的に安定した形状を目指した。根の形に関する資料を参考にし、根の分岐本数や根の分岐の角度など様々な要素を考慮したスケルトンモデルを生成した。そのスケルトンモデルに対し、根の太さを考慮しながらスケルトンモデルの周りに面を貼り付けて形状を生成した。本研究の手法を実装した結果、様々なヤエヤマヒルギの支柱根を容易に生成することができた。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景と目的	1
1.2	本論文の構成	3
<b>第2章</b>	<b>ヤエヤマヒルギの生態</b>	<b>4</b>
2.1	マングローブ植物について	4
2.2	ヤエヤマヒルギについて	5
2.2.1	ヤエヤマヒルギの特徴	6
2.2.2	ヤエヤマヒルギの成長過程	9
<b>第3章</b>	<b>ヤエヤマヒルギの支柱根の形状生成</b>	<b>12</b>
3.1	支柱根の特徴を再現する式の定義	12
3.2	懸垂線について	13
3.3	スケルトンモデルの生成	17
3.3.1	入力パラメータについて	17
3.3.2	懸垂線の形に影響を与える要素	18
3.3.3	支柱根の形に影響を与える要素	21
3.4	ポリゴンの生成について	26
<b>第4章</b>	<b>検証と考察</b>	<b>30</b>
4.1	実装結果	30
4.2	検証	33
4.3	まとめ	34
	<b>謝辞</b>	<b>36</b>
	<b>参考文献</b>	<b>37</b>

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究背景と目的

3次元コンピュータグラフィックス (3DCG) の分野では、自然の風景を現実的に表現することが求められている。そのためには樹木や植物の形を忠実に再現する必要がある。しかし、樹木や植物は形状が複雑なため手作業でモデリングを行うには大変時間を要する。近年、その手間を解消するため樹木や植物の 3D モデルを自動的に生成を行うための研究が多く成されている。これらの研究により、樹木や植物の 3D モデルを多数生成することができ、映像コンテンツや環境シミュレーション、ゲームなどのインタラクティブコンテンツに利用されている。

樹木や植物の 3D モデルを効率的に生成する手法は数多く提唱されている。手書きスケッチによるモデリング手法 [1][2] やジェスチャー入力による生成手法 [3]、光や環境ホルモンの影響を考慮した樹木の生長モデル [4] などがある。商用ミドルウェアである SpeedTree[5] は、樹木の種類を選び、枝長や葉数、重力影響といったパラメータ変数を調整することで、樹木や草花のモデリングができる。自動生成により 3D モデルを生成する手法の多くは、植物成長の過程をアルゴリズム化した L-system[6] を活用しており、植物の生成規則に基づいた樹木や植物の生成ができる。L-system により生成される形状の多くは、樹木曲線と呼ばれるフラクタル図形を活用している [7]。武田ら [8] の研究では、ヒマワリの種の並び方や、植物

の葉の付き方を L-system を用いて形状を生成している。しかし、多くの研究や手法は樹木や植物の幹や枝、葉に注目したものが多く、根に関するものは少ない。

樹木や植物の根は、幹や枝以上に複雑で入り組んだ形状をしている。そのため、根のモデリングは時間を要する。樹木や植物の根に関する既存研究として、Mechら [9] の水環境を考慮した生成手法や、KIM[10] の土の固さや重力などの環境を考慮した手法がある。一般的な植物の根は、主根と側根からなる「主根システム」、もしくは「ひげ根」のどちらかに分類されるが、既存研究はそのどちらかに関するものが多く、また地中のみを対象としている。

熱帯の潮間帯に生息するマングローブ植物は、特殊な根をもつものが多い。マングローブ植物であるヤエヤマヒルギは代表的なマングローブ植物であり [11]、支柱根とよばれる特殊な根を張る樹木である。ヤエヤマヒルギの写真を図 1.1 に示す。支柱根は根であるにも関わらず、地表から根を発生させる。その後、放物線上に地表まで伸ばし幹を支える。支柱根は幾重にも分岐し、その様子はさながらタコの足が絡まったような複雑な形状をなす。この形状をモデリングするには、大変な労力を必要とする。



図 1.1: ヤエヤマヒルギの支柱根の様子

そこで本研究では、ヤエヤマヒルギの支柱根の3次元形状をつくる作業を効率化することを目的とし、ヤエヤマヒルギの特徴を考慮した形状生成を実現した。また、幼木から成木までの、様々な大きさの形状生成を可能にした。形状生成の手法として、根の本数や根の広がり方などのパラメータを考慮し、線で構成されたスケルトンモデルを生成した後、根の太さを考慮しながらスケルトンモデルの周りに面を張る方法を提案する。

本研究の評価は、ヤエヤマヒルギの形状生成に掛かる時間を効率化できているかで判断した。また、アンケートによりヤエヤマヒルギの特徴をとらえた形状生成を達成できているかを調査した。

なお、本研究ではヤエヤマヒルギの支柱根のことを単に支柱根と呼ぶ。特に注釈がない場合、支柱根という言葉はヤエヤマヒルギの支柱根を指す。また、支柱根は複数の曲線根で構成されているが、そのうちの1本を指す場合には根と呼ぶ。

## 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章では本研究で対象とするヤエヤマヒルギの概要について述べる。第3章ではヤエヤマヒルギの特徴に基づいた根の曲線の生成、および環境パラメータの考慮、そして曲線生成からの曲面生成について述べる。第4章では今回提案した手法から得られた実装結果と検証、考察について述べる。

# 第 2 章

## ヤエヤマヒルギの生態

本研究で扱うヤエヤマヒルギは、他の植物にはみられない多数の特徴をもつ。第 2 章ではヤエヤマヒルギの特徴や、ヤエヤマヒルギが属するマングローブ植物について解説する。

### 2.1 マングローブ植物について

マングローブ植物とは、熱帯から亜熱帯地域の河口汽水域の塩性湿地に生息する植物の総称である。なお、ただ単にマングローブと呼ぶ場合はマングローブ植物があつまった地帯を指す [12]。

マングローブ植物は Tomlinson[13] の調査によると世界に 110 種類程あり、マングローブ植生分布の 9 割以上はヤエヤマヒルギが属するヒルギ科で構成される。マングローブ植物の植生地帯は泥質な土壌で嫌気性があり、根から呼吸を行いきくい。この問題を解決するために、マングローブ植物は呼吸を行うための根を発生させる。この根は呼吸根と呼ばれ、呼吸根は特徴的な形を持つ。大別すると 4 種類に分類できる [12]。その 4 種類について説明する。

#### 1. 支柱根

本研究で扱う根であり、マングローブ植物を代表する根系である。支持根ともいい、英名は prop-root である。

タコ足のような根を、地表または水面より上から四方に伸ばし、それらが不安定なやわらかい泥の上に根をめぐらせ幹を支えている。樹高は大きいものでは30メートルにもなる。

## 2. 膝根（しっこん）

屈曲膝根ともいう。人が膝を曲げた様な形に名前が由来する。1本の地面を這う根が持ち上がって膝根となる。瘤の上部からは数本の根を支柱根状に伸ばす。またその根が伸び持ち上がり、膝根を作る。

## 3. 筍根（じゅんこん）

棍棒根、棒状根、直立根ともいう。膝根の派生形であり、膝根の仲間で変形膝根とも言う。地面を這う根が伸びる過程で一部が地表へ根を伸ばし、筍に似た棒状の根を形成する。

## 4. 板根

板根という名前が表すように、幹の根本に放射状に大きな衝立を波立たせたような形状をしている。支柱根の脊梁の部分が年々成長して高くなり、やがて板のようになることで形成される。

## 2.2 ヤエヤマヒルギについて

ヤエヤマヒルギとは、ヒルギ科ヤエヤマヒルギ属の常緑高木で、熱帯付近に生息するマングローブ植物である。マングローブ植生の大部分はヤエヤマヒルギで構成されている。日本での分布は、名前の由来である沖縄県八重山諸島付近や西表島など、沖縄本島が自然分布の北限となっている。ヒルギ科のメヒルギに限っては、植栽や人為的移植により前者は鹿児島県喜入町、後者は静岡県伊豆半島の弓ヶ浜に見られる。



## 2.2.1 ヤエヤマヒルギの特徴

ヤエヤマヒルギは生態的にも形状的にも他の植物には見られない、ヤエヤマヒルギ特有の特徴を持っている。根の形状生成をするにあたり、その特徴を考慮する必要がある。そこで、本研究で考慮するヤエヤマヒルギが持つ特徴を次に列挙する。なお、ヤエヤマヒルギの特徴については佐藤 [14] の研究を参考とした。

- **支柱根を発生させる**

前述のように、ヤエヤマヒルギの根は自身を支えているために支柱根と呼ばれる。支柱根の持つ特徴を次に詳しく述べる。

- － **根を地表より上から出す**

支柱根は地中ではなく地表から根を伸ばす。根が地表から発生するのはマングローブ植物の特徴でもある。図 2.1 は、横から見たヤエヤマヒルギの支柱根の模式図である。



図 2.1: 支柱根の模式図

- － **しなやかな根を地表まで伸ばす**

地表上から伸びた根は、放物線を描くようになめらかな根を伸ばし、地表または海中下の泥の中へと根を伸ばす。

－ **ほぼ一定間隔で根を分岐させる**

支柱根は他の植物同様、根が分岐しながら成長していくが、ほぼ決まった間隔で根が分岐していく。

－ **根の分岐は限りがある**

主幹から出た根を1次根、1次根から出る根を2次根と分類したとき、佐藤の研究によるとヤエヤマヒルギの支柱根は5次根まで分岐する。

－ **1次根の位置が低いほど分岐数が少なく、高いほど分岐をする**

ヤエヤマヒルギの支柱根は、主幹から分岐した地点の高さに応じて根の分岐次数が変化する。

－ **根は四方八方にバランスよく根を伸ばす**

支柱根は自身を支える必要があるため、幹を中心として重心をとるように根を伸ばす。図2.2と図2.3は、佐藤の研究で記載されている、ヤエヤマヒルギの主幹を軸に真上から見た根の様子を、次数別に着色したものである。このように重心を取るようにして根を伸ばしていることがわかる。なお、図の色は根の次数を表し、1次根、2次根と分岐が進むほどそれぞれ赤色・橙色・黄色・乳白色・白色となっている。

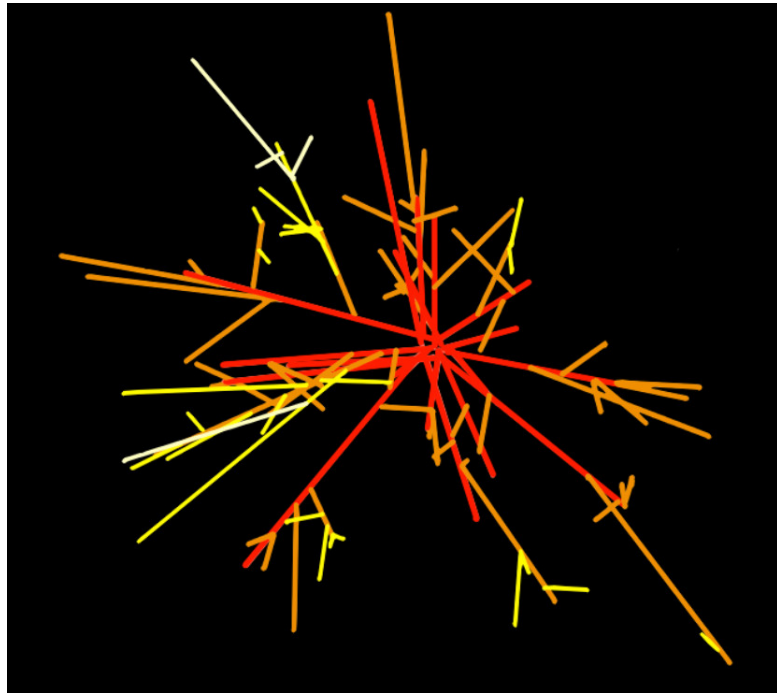


図 2.2: 真上から見た支柱根の様子 1

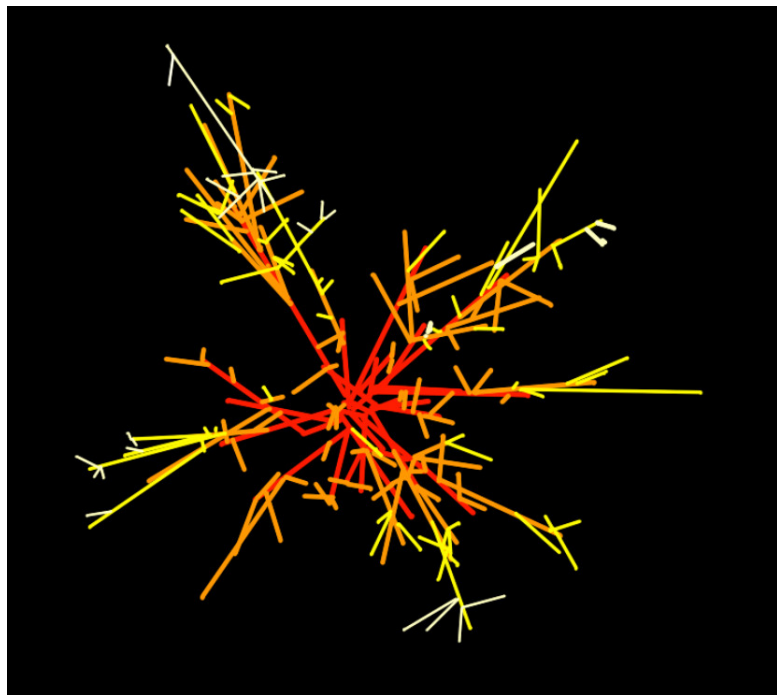


図 2.3: 真上から見た支柱根の様子 2

– 根の太さは分岐点で最も細く、末端に行くほど太くなる

通常、植物の根は末端に行くほど細くなるが、支柱根は根の分岐点で最も細く、根の末端近くになるほど太くなる。

● 3通りの根の広がりがある

支柱根は根の型が3つあると佐藤は文献 [14] で述べている。最もよく見られる型を標準型と呼ぶ。図 2.4 は標準型の図である。その根の広がり方を基準としたとき、標準型よりも外側へ外側へと広がる型があり、本研究では緩傾斜型と呼ぶ。図 2.5 は緩傾斜型を表している。主幹からほぼ真下へ柱のようになれる型で、本研究では急傾斜型と呼ぶ。図 2.6 はそれを表している。

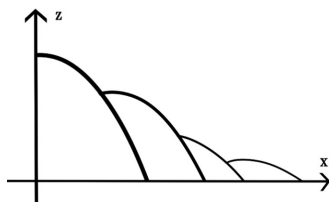


図 2.4: 標準型

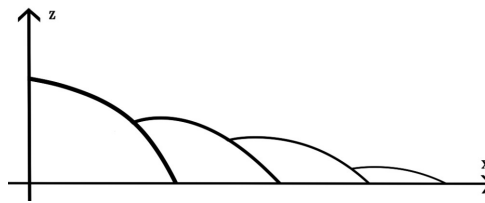


図 2.5: 緩傾斜型

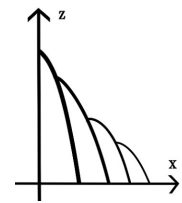


図 2.6: 急傾斜型

## 2.2.2 ヤエヤマヒルギの成長過程

ヤエヤマヒルギの成長過程は、支柱根の発生過程を理解する上で重要となる。ヤエヤマヒルギは胎生種子が泥上に根付き成長する。ある程度成長すると胎生種子から主幹と枝葉が発生する。その後、主幹から初めて1次根が出現する。図 2.7はその様子を表している。成長すると1次根の本数が増える。図 2.8はその様子である。さらに大きくなると、2次根や3次根が発生、根を分岐させ広げていく。図 2.9と図 2.10はその様子である。

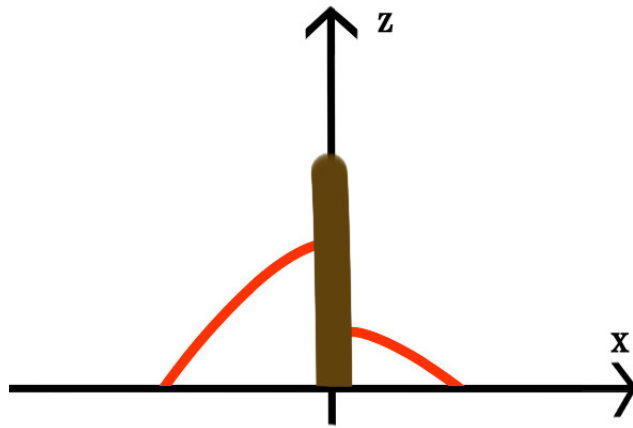


圖 2.7: 成長過程 1

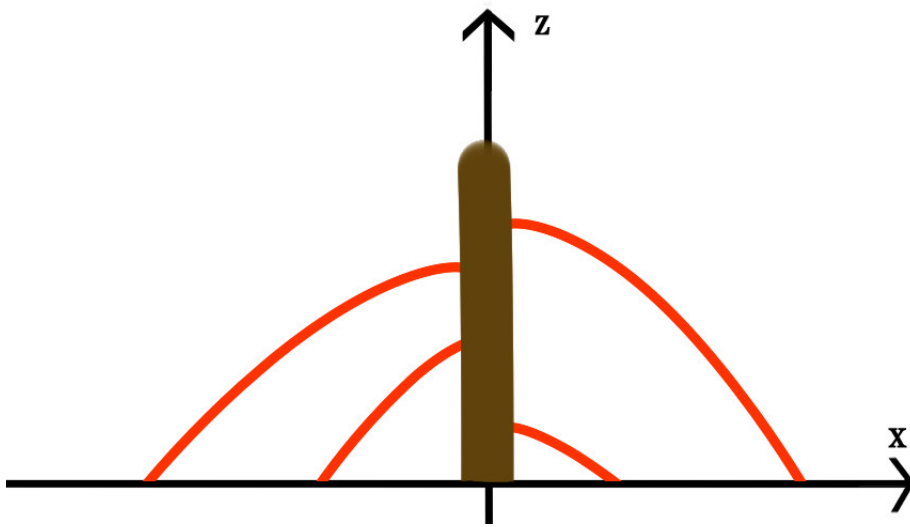


圖 2.8: 成長過程 2

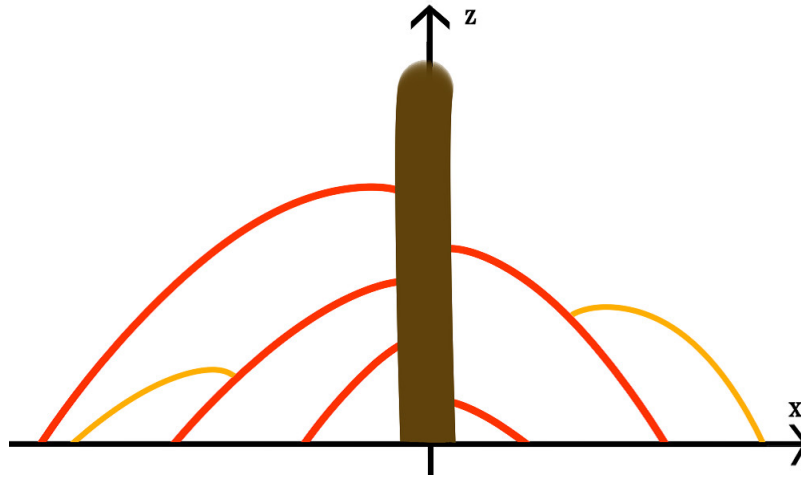


図 2.9: 成長過程 3

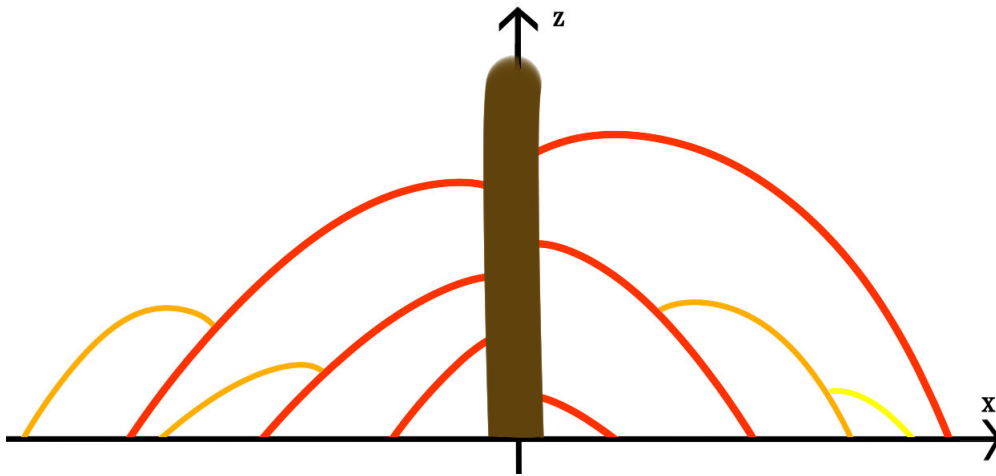


図 2.10: 成長過程 4

根は成長の過程で分岐するが、初期段階で生成した根ほど分岐がみられない。後から発生した根、つまり高い位置から分岐が始まる根ほど分岐がすすむ。それは図 2.2 と図 2.3 から確認できる。

## 第 3 章

# ヤエヤマヒルギの支柱根の形状生成

本章では、2章で述べたヤエヤマヒルギの特徴を考慮し、3次元形状の支柱根モデルの生成を行う。本研究では様々なヤエヤマヒルギの形状を生成可能するために、支柱根を形成する要素をパラメータ化し、調節できるようにした。本研究では以下の手順で支柱根を生成する。

1. 支柱根のパラメータを入力する。
2. 支柱根の特徴とパラメータを考慮した曲線を生成し、線でモデルを作る。
3. 支柱根の規模に対応した主幹を生成する。
4. 線のモデルに面を張り、ポリゴンモデルを生成する。

この章では3.1、3.1節で根の特徴を再現するための曲線について述べ、3.3節でパラメータを考慮したスケルトンモデルの生成方法について述べる。スケルトンモデルとは、線で構成された支柱根形状全体を指す。主幹の生成とスケルトンモデルに面を張るためのポリゴン生成に関しては3.4節で述べる。

### 3.1 支柱根の特徴を再現する式の定義

植物をコンピュータで再現する際、植物の形を式で定義する必要がある。しかし、定義されていない、あるいは法則性がない樹木や植物をコンピュータで再現

する場合、対象物に似た性質や形をもつ式を作り代用することになる。支柱根はその形をつくる数式が解明されていないため、本研究で式を定義する必要がある。

支柱根は放物線を描いたような形として認識されている [12]。支柱根と放物線を比較すると形は似ているが、特性を考慮しているとはいえない。支柱根は、幹本体を支えるためにその独特な形状を取っていると考えられている [12]。それを本研究では、支柱根は根の各々が力学的に安定した形になっていると仮定した。そこで力学的に安定した曲線が必要となるが、その要素をもつ曲線として「懸垂線」がある。本研究では根の生成に、懸垂線を用いて支柱根の形状を行った。

## 3.2 懸垂線について

カタナリー曲線とも呼ぶこの曲線は、両手でロープの両端を持った時にできる曲線である [15]。懸垂線の計算式は、1691年にベルヌーイの法則で知られるスイスの数学者ヨハン・ベルヌーイによって導かれた。その一般式を式 (3.1) に表す。

$$y = a \cosh \left( \frac{x}{a} \right) \quad (3.1)$$

$\cosh$  は双曲線関数とよばれ、三角関数に類似した関数である。 $a$  の値により曲線の傾き具合を決定する。双曲線関数の特徴として、関数自体が横になった懸垂線を描くことが挙げられる。 $\cosh$  を計算で用いる場合、指数関数  $e$  を用いて式 (3.2) のように表せる。

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (3.2)$$

よって、数値を代入し計算を行う際の懸垂線を示す式は、式 3.3 になる。

$$y = a \left( \frac{e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}}}{2} \right) \quad (3.3)$$



図3.1は懸垂線を表す式3.3をグラフ状にプロットしたものである。なお懸垂線は $a < 0$ のときは両手でロープを持った形になり、反対に $a > 0$ だとアーチ状になる。 $a$ は0に近いほど、 $x$ 軸に平行な直線と近似する。

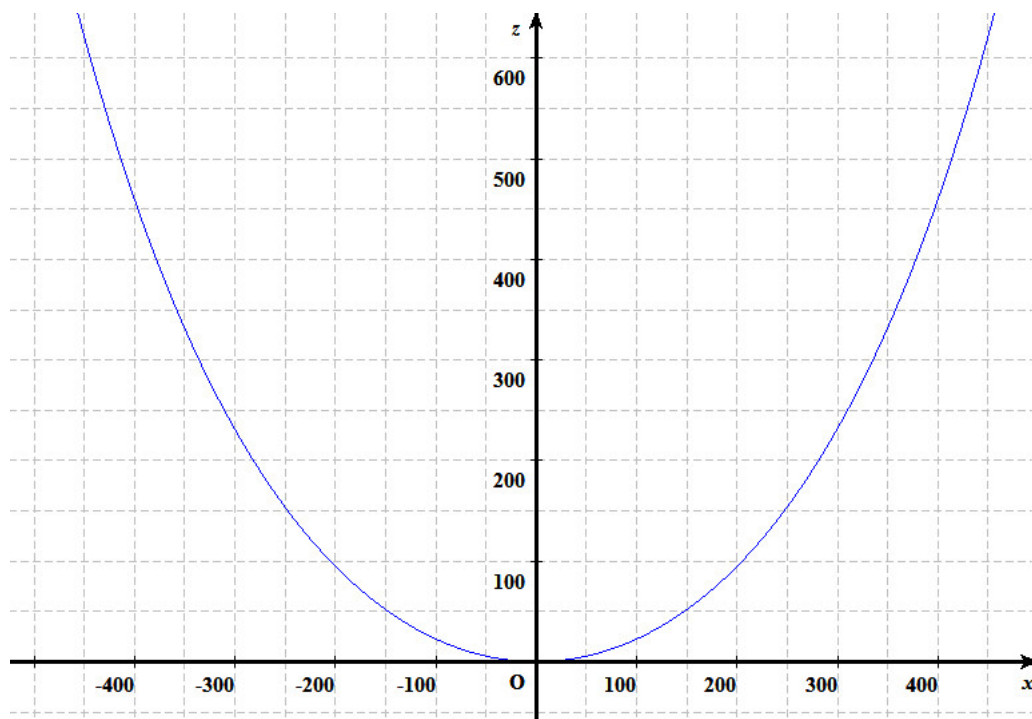


図 3.1: カテナリー曲線 (仮、軸の数値を後で消す)

懸垂線は、一様な質量密度を持った曲線を吊るしたときに、力学的に最も安定している形になっている。力学的に安定しているため、建築分野に活用される。古くから橋の建設には懸垂線が用いられている。

以上のように、懸垂線は力学的に安定しているため、支柱根の再現に最適であると考えられる。図3.2と図3.3は、ヤエヤマヒルギの根と懸垂線の比較である。この図から、懸垂線は根と非常によく類似していると見なせる。本研究では支柱根の生成を、懸垂線の変数を調節することで、さまざまな根の形を作る。

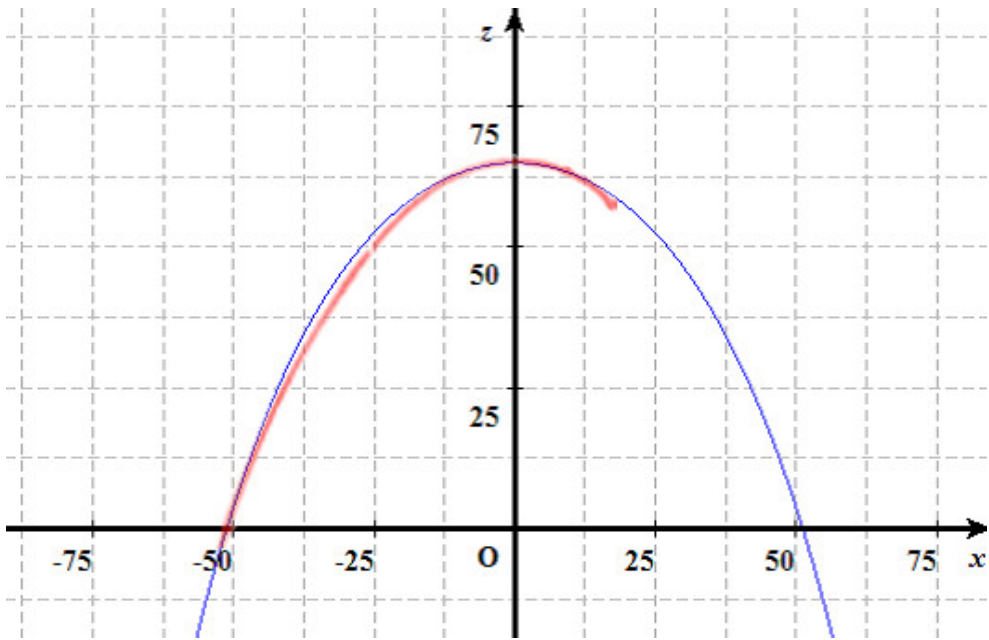


図 3.2: 根と懸垂線の比較 1

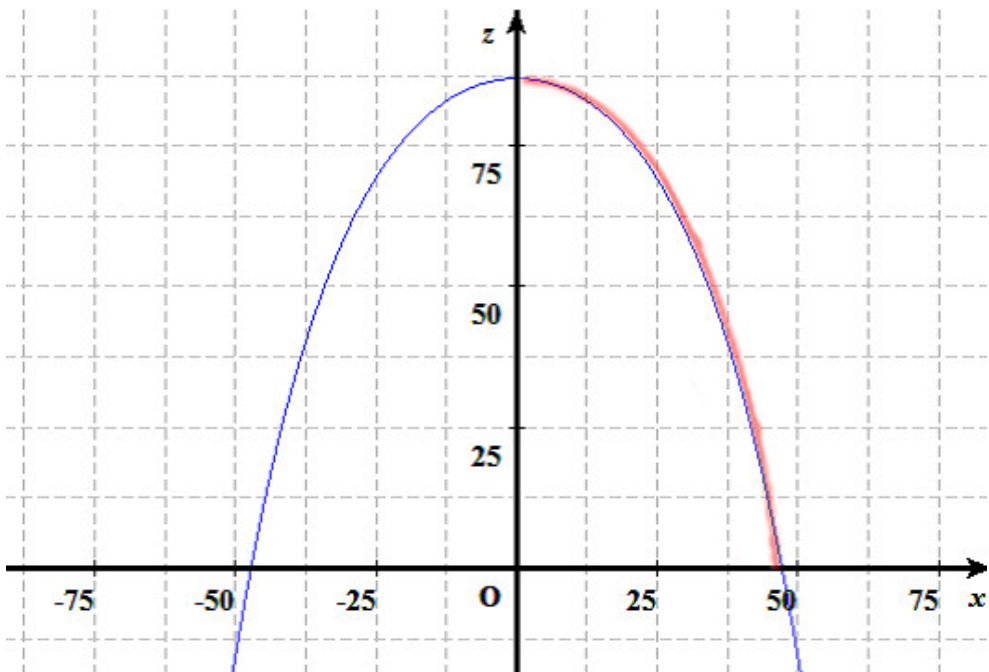


図 3.3: 根と懸垂線の比較 2

ヤエヤマヒルギの根を生成するための懸垂線の式は、分岐地点の高さ値  $b$  を加え式 (3.4) のように定義する。変数  $a$  は弛度を表しており、値は根の傾斜に影響する。

$$y = a \cosh\left(\frac{x}{a}\right) + b \quad (3.4)$$

懸垂線は  $a < 0$  のとき、特性として変数  $a$  の値を小さくすると、 $x = 0$  における高さが減少する特性をもつ。図 3.4 は懸垂線  $y = a \cosh \frac{x}{a} + 100$  において、 $a$  の値が  $-5, -20, -50$  と変化したときの様子を表している。

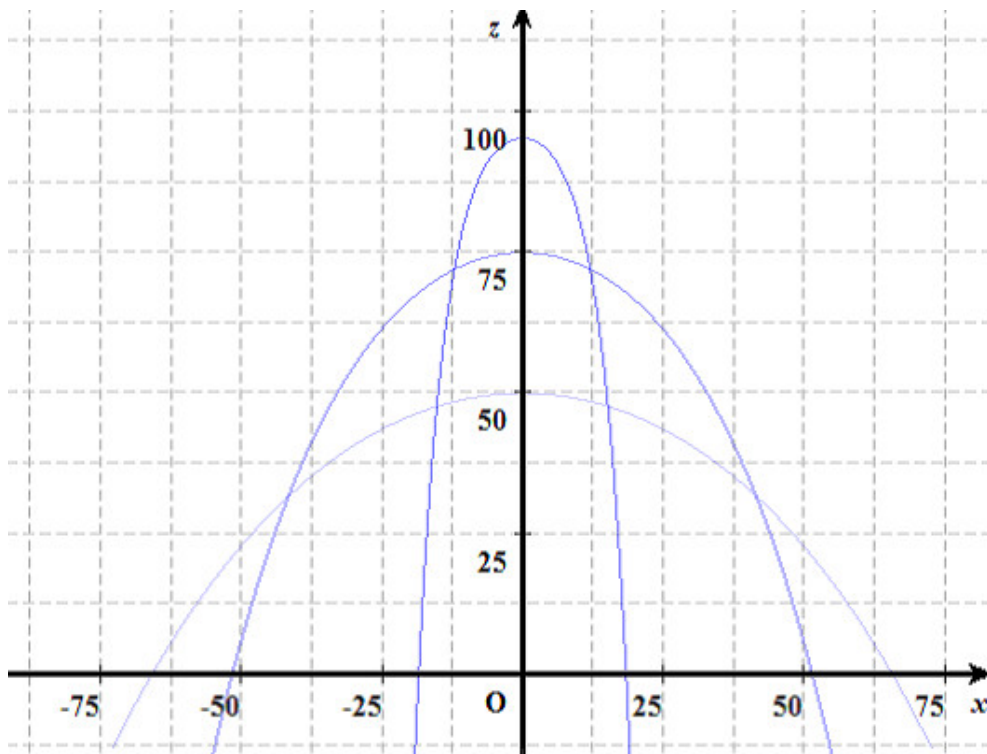


図 3.4: 高さの減少の様子

図 3.4 より、 $x = 0$  の地点において、高さの減少が確認できる。本研究では便宜上、 $a$  の値により減少する高さを加え補正することにより、簡単に任意の高さから生成を行えるようにする。補正值は  $a \cosh \frac{x}{a}$  において  $x = 0$  を代入した値である。それを元の式に加えればよい。つまり  $a \cosh \frac{0}{a} = a$  となる。アーチ状の懸垂線を生

成するための条件は  $a < 0$  なので、最終的な根を生成するための式は式 (3.5) のようになる。

$$y = a \cosh \frac{x}{a} - a + b \quad (a < 0) \quad (3.5)$$

### 3.3 スケルトンモデルの生成

本研究は根の生成にあたり、懸垂線を用いてスケルトンモデルを作り、そのまわりに面を張っていくことで形状を生成する。スケルトンモデルの生成に必要な入力パラメータについては 3.3.1 節で、懸垂線の形に影響を与える要素と支柱根の形に影響を与える要素については 3.3.2 節と 3.3.3 節で説明をする。

#### 3.3.1 入力パラメータについて

本研究は生成開始時に最大 7 つのパラメータを入力した後に生成を行う。これにより様々な支柱根が作成できる。次のパラメータは根のしなり具合、根の規模、根の長さを決定するものである。

- 標準型、急傾斜型、緩傾斜型の選択
- 主幹からの根の分岐本数 (1 次根の数)
- 根の盛り上がり頻度
- 根の最大分岐次数
- 根の最大分岐本数

根の盛り上がりとは、図 3.3 のように、根の分岐地点よりも根の高さの最大値が高いことを指す。これは支柱根によって盛り上がる頻度が一定ではないので、任意で調節可能にした。また、根の最大分岐次数と最大分岐本数は、値によっては

支柱根らしくない形になりうる。たとえば、1次根の数3本に対して、根の最大分岐次数が5次根まであることはありえない。そのため、任意で調節可能にした。

また、次の2つのパラメータによりポリゴン生成の細かさを決定することができる。

1. 根の円の分割数
2. 根の曲線の分割数

なお本研究ではパラメータ値の決定するための支柱根形状の資料として、佐藤[14]の研究で用いられているヤエヤマヒルギの観察図を利用している。

### 3.3.2 懸垂線の形に影響を与える要素

懸垂線  $y = a\left(\frac{e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}}}{2}\right) - a + b$  の形は、 $a$  と  $b$  の値により決定される。この項目では、 $a$  と  $b$  の値に影響を与える要素を述べる。

#### 1. 根の型

2.2.1 節で述べたように、根の型は急傾斜・標準型・緩傾斜型の3つがある。懸垂線の式で弛度を表している  $a$  の値はそれぞれの型において、次の値の範囲から乱数を用いて決定した。

- **緩傾斜型**  $-550 \leq a \leq -300$
- **標準型**  $-330 \leq a \leq -150$
- **急傾斜型**  $-70 \leq a \leq -10$

以下の図3.5、図3.6、図3.7は、懸垂線  $y = a\left(\frac{e^{\frac{x}{a}} + e^{-\frac{x}{a}}}{2}\right) - a + 100$  のそれぞれの型が取りうる形の範囲である。塗りつぶした範囲で懸垂線が生成される。

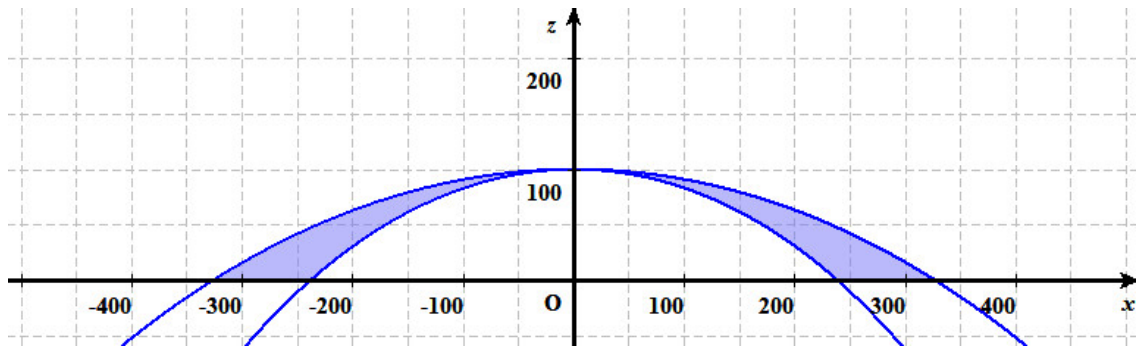


图 3.5: 緩傾斜型

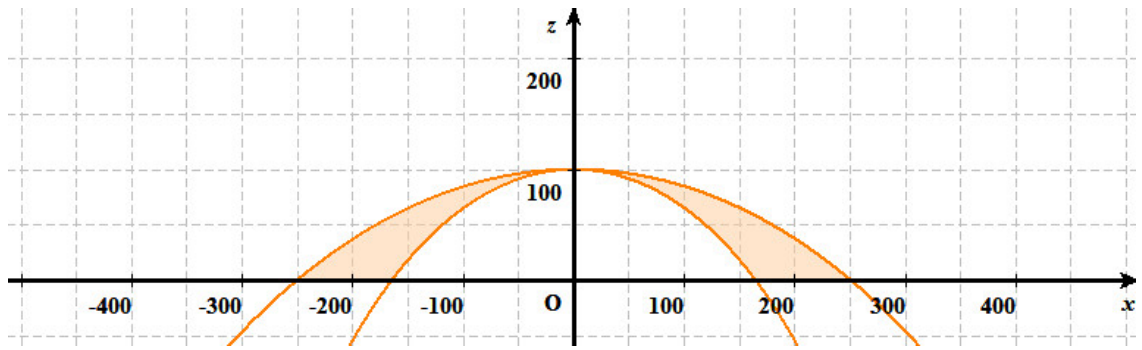


图 3.6: 緩傾斜型

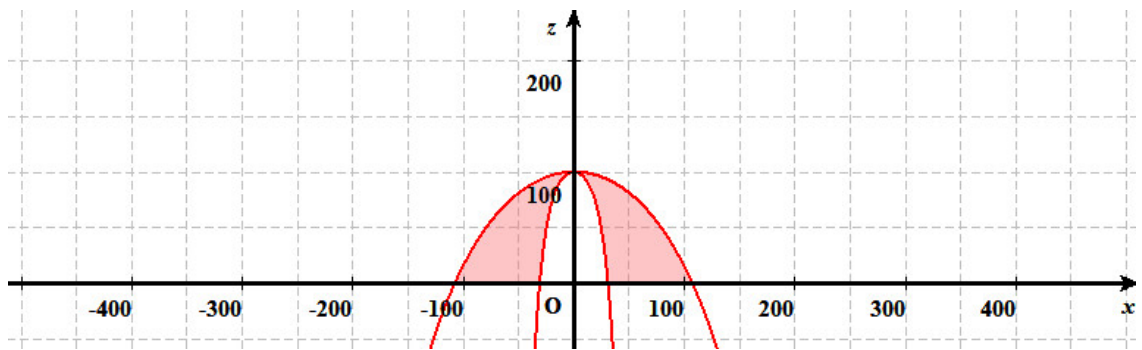


图 3.7: 緩傾斜型

## 2. 根の分岐する高さの位置

佐藤の研究によると、支柱根は主幹の地表際近くでは1次根がみられない。また2次根以降も同様であり、一定の高さがないと分岐をしない。それを考慮し、本研究では高さ $b$ の範囲を $b \geq 9$ とした。

根の高さの最大値は根の規模により変動する。本研究では1次根の本数と根の発生する最大値を定めた。根の高さは高さの最小範囲から最大値の間で乱数を用いて決定した。1次根の本数と高さの最大値の関係を表3.1に示す。

表 3.1: 1次根の本数と高さの最大値の関係

1次根の本数	高さの最大値
1 ~ 5	40
6 ~ 8	60
9 ~ 14	90
15 ~ 18	100
19 ~ 30	110
31 ~ 50	120
51 ~ 100	130

2次根以降の分岐の高さは分岐回数に関わらず一様に、分岐する元の根の高さの15% ~ 80%の間から乱数を用いて分岐を行うようにする。

## 3. 根の盛り上がりの具合

根は図3.3のように、分岐地点の高さよりも根の最大位置が高くなる場合がある。本研究では、根の分岐地点の高さから120%を超えない範囲を、根が盛り上がる範囲とした。

## 4. 根の盛り上がり頻度

根の盛り上がりは、根の型に応じて個体差があるようで、根の盛り上がりが発生する頻度はまちまちである。例えば標準型である図2.3の支柱根にお

いては、根の本数 389 本に対して、盛り上がっている根の割合は約 2% であるが、他の標準型の支柱根では約 10% の場合もある。また、急傾斜型の支柱根にはほとんど見られなくなる一方で、緩傾斜型の根は根の半数が盛り上がる場合もあれば、一切盛り上がらない場合もある。

そこで本研究では、盛り上がり頻度を指定しない場合、根の盛り上がり頻度は根の型に応じて表 3.2 のように設定した。

表 3.2: 根の型と根の盛り上がり頻度の関係

根の型	盛り上がる頻度
標準型	5%
緩傾斜型	10%
急傾斜型	1%

### 3.3.3 支柱根の形に影響を与える要素

生成された平面の懸垂線を、立体の支柱根の形に整えていく必要がある。根の分岐本数や分岐次数など、支柱根の形に影響を与える要素を説明する。

#### 1. 主幹からの根の分岐本数

本研究では様々な大きさ、つまり幼木から成木までの生成を目的とする。2.2.2 節で成長過程を示したが、ヤエヤマヒルギは成長具合を主幹から分岐した 1 次根の数により表すことができる。成木における主幹からの 1 次根の本数は 50 本程度である。本研究ではさらに規模が大きい場合も考慮し、100 本までの生成を可能にする。

#### 2. 根の重心考慮

支柱根は根で自身を支え重心をとっていることを考慮するため、本研究では 1 次根の数だけほぼ均等に、主幹の周りに配置する。均等にすぎると根の形が規則性のある人工物のようになるため、1 次根の本数を  $x$  とした



とき、すべての根の配置に  $\pm \left(\frac{60}{x}\right)^\circ$  程度のばらつきを加える。たとえば1次根が6本の場合、約  $60^\circ \pm 10^\circ$  おきに根を配置していく。

### 3. 根の最大次数

根の最大次数は前述のとおり、大きいものは5次根まで分岐が見られる。本研究では最大5次根までの生成を可能にする。根の最大次数は1次根の本数によって表3.3のように定めるが、任意で次数を指定できるようにする。

表 3.3: 1次根の本数と最大次数の関係

1次根の本数	最大次数
1 ~ 8	1
9 ~ 14	2
15 ~ 18	3
19 ~ 30	4
31 ~ 100	5

### 4. 根の分岐頻度と1本の最大分岐数

ヤエヤマヒルギの1本の根に対して分岐が起こる頻度、つまり  $n$  次根から分岐する  $n+1$  次根の本数は、支柱根が大きくなるほど高くなる。また、支柱根は大きくなるにつれ、分岐数が多くなる。

本研究では、根の分岐は根を地面まで生成する過程で、一定の確率で行う。そのため、根が長いほど1本当たりの分岐数が多くなる。つまり、1次根の本数が多いほど生成する根の高さが増すので、1次根の本数に応じて1本あたりの分岐頻度が変化する。同様に、根の最大分岐数を設け、1次根の本数が多いほど最大分岐数が増すようにする。根の1本あたりの分岐頻度と、最大分岐数の関係を表3.4に示す。

表 3.4: 1 次根の本数と根の分岐頻度・1 本の最大分岐数の関係

1 次根の本数	1 本あたりの分岐頻度	1 本の最大分岐数
1 ~ 5	0	0
6 ~ 8	0.3	2
9 ~ 14	0.8	3
15 ~ 18	1.0	4
19 ~ 30	1.5	5
31 ~ 50	2.0	5
51 ~ 100	2.5	6

## 5. 根の分岐角度

根の結合時点では、根に角度を与えていないので一定の方向を向いている。そこで、次に 2 次根から 5 次根に角度をつける。本研究でいう角度は、 $n$  次根の分岐元である  $n - 1$  次根の根を基準としたものである。図 3.8 にその様子をしめす。なお、角度は根を真上から見下ろしたときに、時計まわりの方向を +、反時計まわりの横行を - として定義した。前述の支柱根形状の資料を参考に、根の分岐角度の頻度をまとめた。それを図 3.9 に示す。

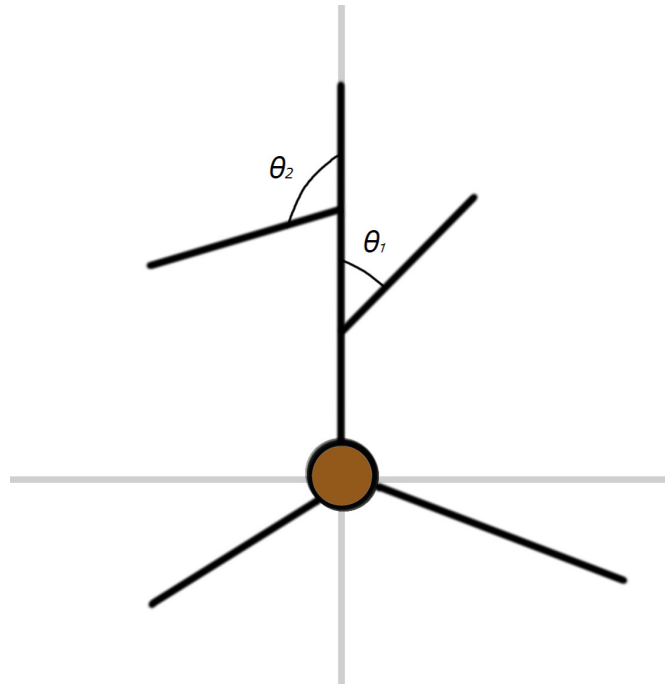


図 3.8: 角度の求め方

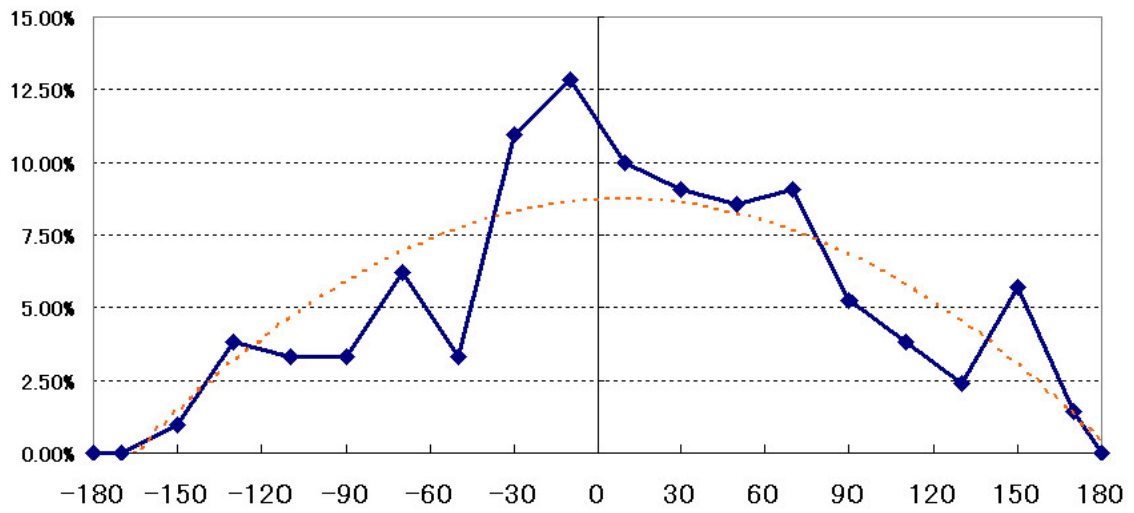


図 3.9: 分岐角度の頻度

分岐角度の分布結果から、分岐角度は急なほど発生割合が低いことがわかった。また、 $\pm 170^\circ$  よりも急な、根の発生方向と真逆に出るような根はなかった。本研究では角度をこの結果に沿って考慮した。

また、分岐角度が大きくなるほど根の傾斜が強くなる傾向があった。そこで本研究では、分岐角度に応じて根の傾斜を数倍にした。通常根の傾斜角度を1としたときの、分岐角度と根の傾斜の関係を表3.5に示す。なお、表3.5の分岐角度の値は、 $\pm$ 両方の場合である。

表 3.5: 分岐角度と根の傾斜の関係

分岐角度 ( $\pm$ )	根の傾斜の強さ
$0^\circ \sim 20^\circ$	1
$20^\circ \sim 40^\circ$	2
$40^\circ \sim 60^\circ$	4
$60^\circ \sim 80^\circ$	6
$80^\circ \sim 100^\circ$	8
$100^\circ \sim 120^\circ$	10
$120^\circ \sim 140^\circ$	15
$140^\circ \sim 160^\circ$	20
$160^\circ \sim 180^\circ$	25

こうして、角度をつけた一例を図3.10に示す。1次根の数だけ図3.10のような根系ができあがる。

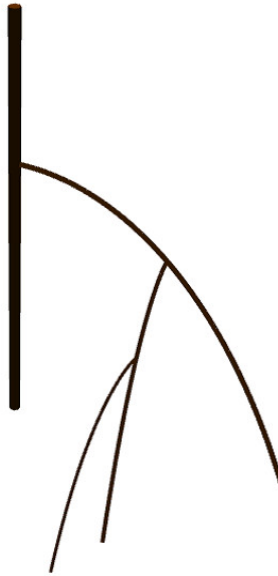


図 3.10: 角度をつけた根の形

## 6. 主幹の大きさ

ヤエヤマヒルギの支柱根は、根の規模が大きくなるに従って主幹が大きくなる。これは他の植物と同様である。根の数に応じて太さを変えるため、主幹の生成は最も最後になる。主幹の大きさの決定については次の 3.4 節で述べる。

## 3.4 ポリゴンの生成について

### 1. 主幹の生成

主幹は円柱形とし、半径と高さにより大きさを定義する。高さは生成された支柱根のうち、最も位置が高いものよりも 2 割長くする。根の太さと同様に、主幹の半径は成長により大きくする必要があるので、1 次根の数に応じて太くしていく。

根の太さを決める半径  $r$  の値は 1 次根の本数  $x$  に比例させ、式 (3.6) で定義する。

$$r = 5 + \frac{x}{10} \quad (3.6)$$

## 2. 面の張り方

本研究では根の周りに円状の頂点を作成し、その点をつなげていくことで面を生成し 3 次元形状を作る。まず、曲線を形成している点すべてに対して、その点を中心に任意の角度  $\theta$  ごとに、中心から  $r$  の距離を持つ頂点を平面上に取る。こうして得られた点群を円  $C$  とする。その様子を図 3.11 に示す。これにより、生成するモデルのポリゴンの細かさを指定できる。

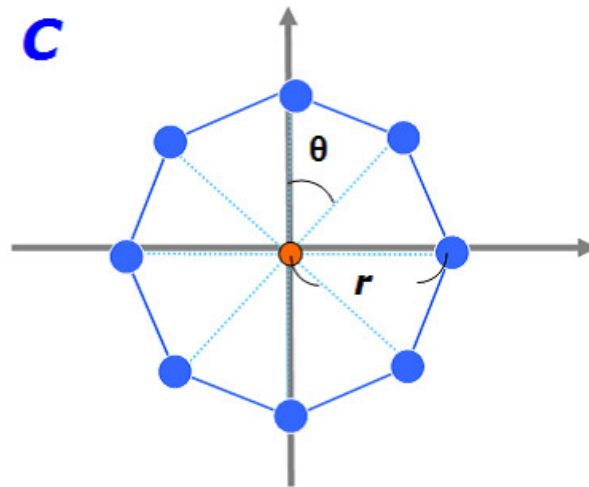


図 3.11: 円状点群の生成

生成した円  $C$  を根の進む順番に  $C_1, C_2, \dots, C_n$  とする。円は生成時、主幹の分岐地点の面と垂直になっている。次に、根の末端に当たる円  $C_n$  を、地面と平行にした後、 $C_n$  のひとつ前の  $C_{n-1}$  を、 $C_{n-1}$  が  $C_n$  の方向を向くように

回転させる。これを末端から分岐点へ向けて順番に行う。こうすることで、ポリゴン同士をつなげた時に、垂直時より自然な曲線形状が生成できる。

以上のように円の向きを調節したあと、 $C_1$  から  $C_2$ 、 $C_2$  から  $C_3$ 、 $C_{n-1}$  から  $C_n$  へ順番にポリゴンをつなげて、根のモデルを生成する。その様子を図 3.12 に示す。

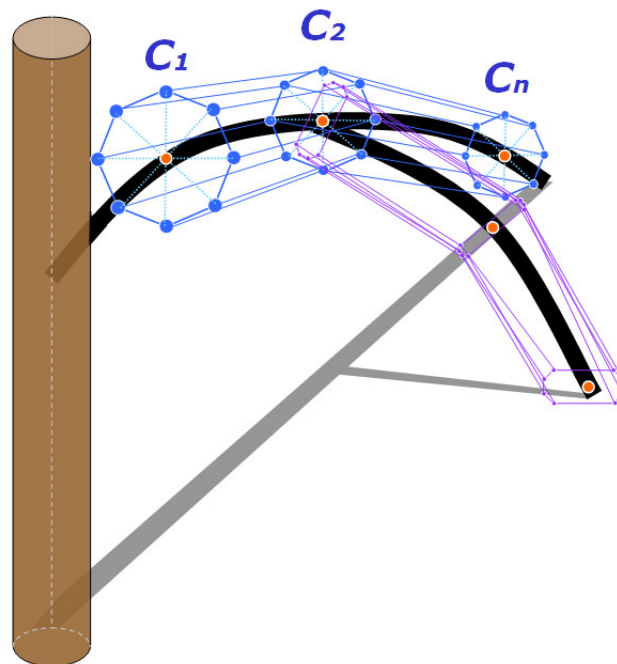


図 3.12: 面の張り方

### 3. 根の太さ

支柱根の根の太さは、根の成長具合によって変わる。また、根の太さは分岐地点で最も細く、地表際になるほど根が太くなる。本研究では、地表際を分岐地点と比べたとき 1 割ほど大きくなるようにする。根の点に対する円  $C_n$

の半径を  $r_n$  としたとき、 $n$  の値が大きくなるに従って半径  $r_n$  の長さを増加することで根の太さを考慮した。

また、分岐の次数が進むほど根が細くなる。本研究では、分岐が進むにつれて、分岐元の根の半径が2割短くなるようにした。

根の太さを決める半径  $r$  の値は、1次根の本数  $x$  に比例させ、式 (3.7) で定義する。

$$r = 1 + \frac{x}{10} \quad (3.7)$$



# 第 4 章

## 検証と考察

### 4.1 実装結果

2 章、3 章で述べたヤエヤマヒルギの特徴と、その特徴を考慮した生成手法を、3D グラフィックツールキットである FK system[16] を用いて実装をした。

図 4.1 は、本研究の手法から得られた支柱根である。この支柱根は生成時に、図 2.2 を元にパラメータに置き換えた値を入力した。なお、図 2.2 のパラメータは、根の広がり方は標準型で 1 次根が 20 本である。

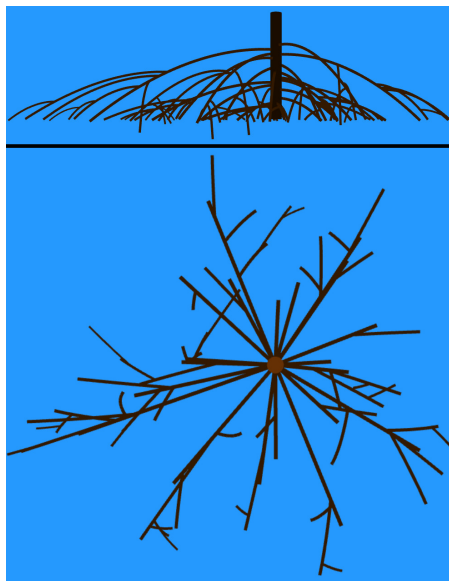


図 4.1: 支柱根の生成結果

図 4.2 は急傾斜型の若い支柱根、図 4.3 は緩傾斜型の中規模の支柱根、図 4.4 は標準型の成長した支柱根を想定して、パラメータ値を変えて生成した支柱根である。また図 4.4、図 2.3 と同じパラメータである。なお、根は分岐の様子が分かりやすいように次数別に着色している。それぞれ、根の型や規模など、ヤエヤマヒルギの特徴を考慮して形状が生成されていることが確認できる。

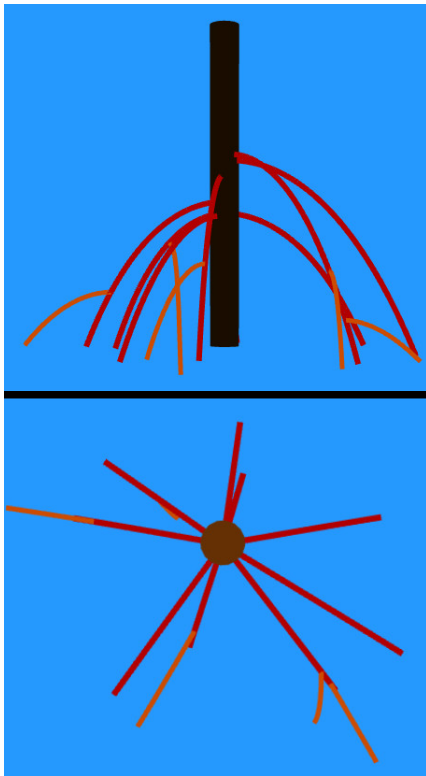


図 4.2: 急傾斜型 (1 次根の数:7)

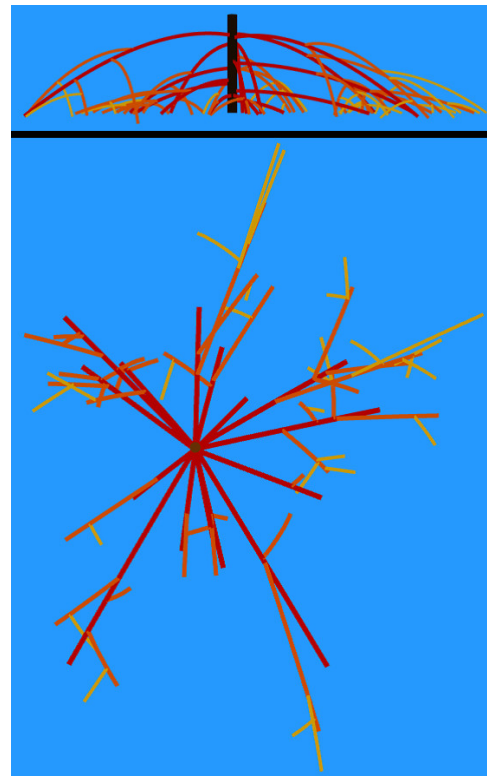


図 4.3: 緩傾斜型 (1 次根の数:15)

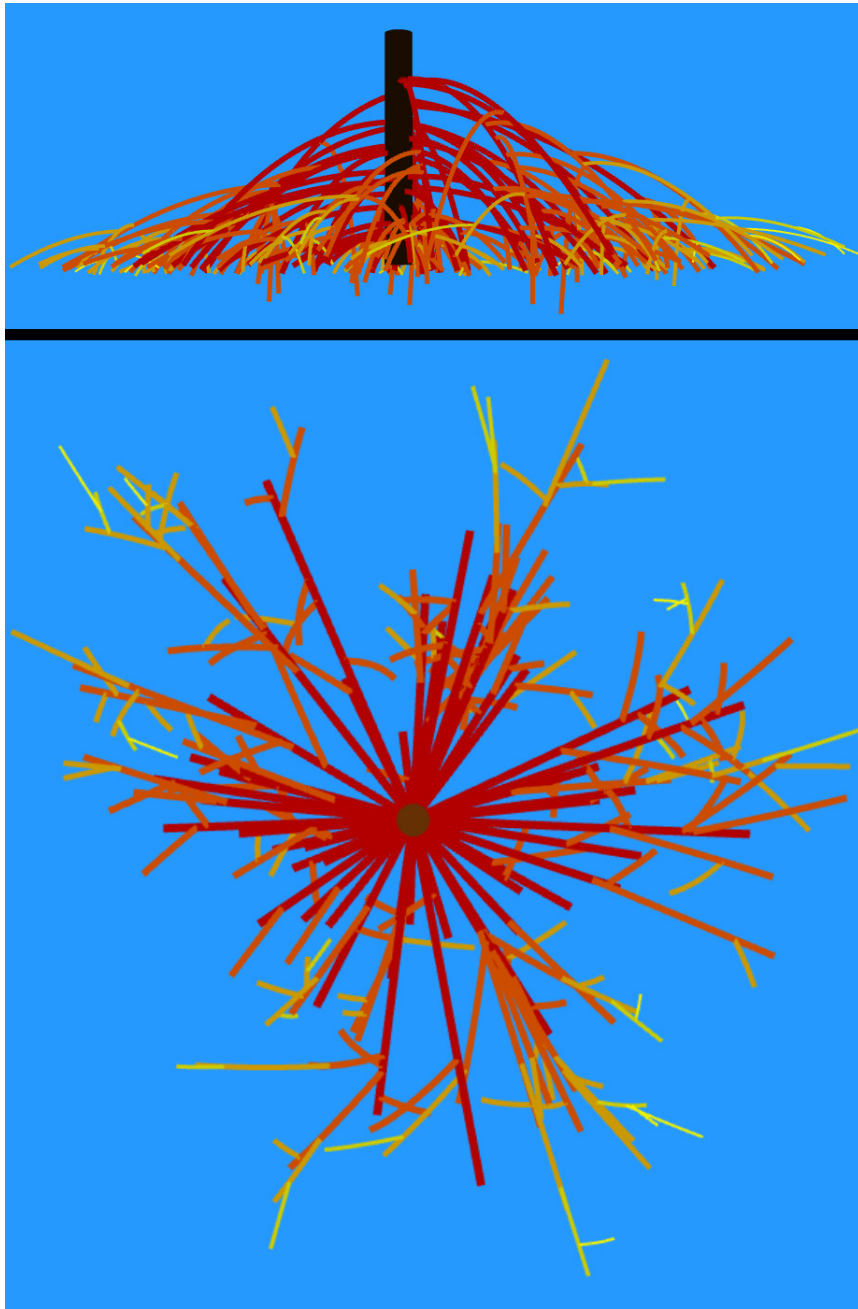


図 4.4: 緩傾斜型 (1次根の数:49)

## 4.2 検証

本研究の手法で作成した支柱根が、モデリング作業の効率化が達成できているかを検証する。比較に使用する支柱根の立体モデルは、図 2.2 の支柱根を元に、筆者がモデリングをした。なお、使用したソフトウェアは Windows 版 Shade 10.0[17] である。Shade は自由曲面とよばれるモデリング方法があり、なめらかな曲面を簡単に生成できる。筆者が制作した支柱根の 3 次元モデルを図 4.5 に示す。上が俯瞰図で、下は側面図である。

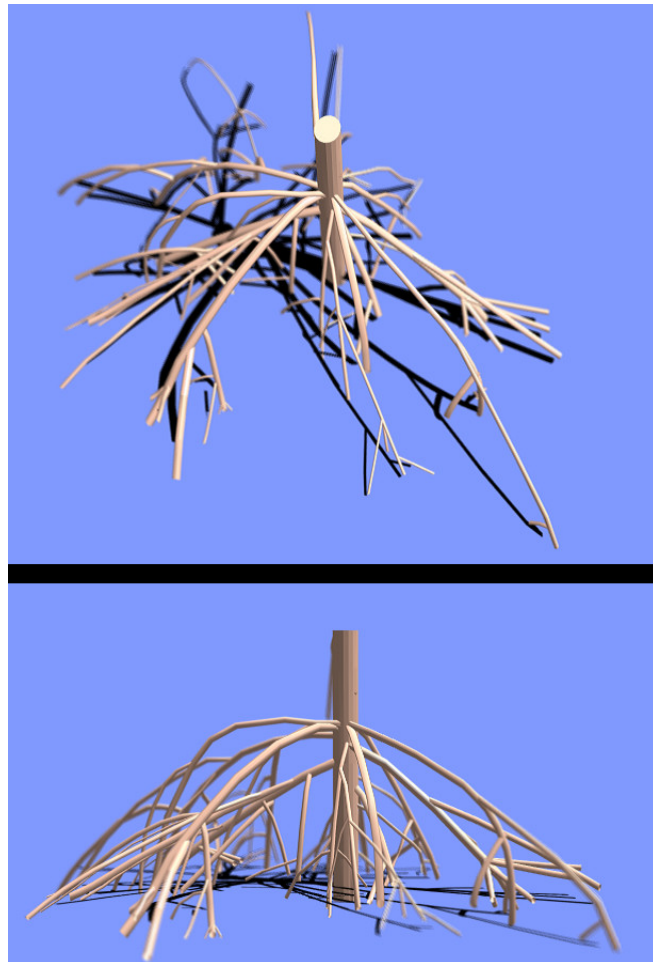


図 4.5: 3DCG で再現した支柱根

筆者がこの支柱根形状を作成するのに 3 時間程要した。本研究により生成され

た支柱根はパラメータ入力から生成まで5秒から20秒程度である。よって、作業効率が飛躍的に向上したといえる。

また、どれだけ形状が本物と似ているかを検証するために、本校の学生を対象としてアンケートを行った。アンケート内容は、被験者に事前にヤエヤマヒルギの特徴を説明し、本研究で生成された支柱根と実際の支柱根とを比較していただく。その後、形状の再現度を割合で評価してもらった。

17人にアンケートを行った結果、84.8%再現されていると評価をいただいた。このことから、本研究は支柱根の特徴を再現できていると考える。

### 4.3 まとめ

本研究ではヤエヤマヒルギの支柱根の生成手法として、力学的に安定している懸垂線を用いて支柱根の形状を再現した。また支柱根をパラメータ化することで、様々な大きさや形の支柱根を作ることができた。また、手作業で支柱根モデルを制作するよりも効率が飛躍的に向上した。アンケート調査により、本手法によって生成された支柱根モデルは、実際の支柱根の特徴を考慮して再現できていることがわかった。

支柱根の自動生成は可能になったが、まだいくつかの課題が残っている。ヤエヤマヒルギは主幹と1次根の接合部はコブのような形に盛り上がっているが、本研究では主幹と枝をただつなげただけである。ヤエヤマヒルギの主幹は本来直線ではなく、成長するほど主幹形状が変化する。そのため、支柱根モデルを近くで見ると不自然である。本研究の生成で、根同士の衝突判定を行っていない。そのため、根同士がぶつかり合う場合があるので、根が衝突した場合、ぶつかった根を消去するなどして根の干渉を解消する必要がある。支柱根は通常、成長途中の、根が地面に到達するまえの空中に留まっている根が混在する。本研究では、根はすべて地面に到達した状態となっている。また、本研究は主幹の一部と支柱根を生成したが、実際に映像コンテンツで使う際には枝や葉も必要となるので、ヤエヤマヒルギ自体を自動生成する手法を考案する必要がある。ヤエヤマヒルギは胎

生種子と呼ばれる、苗木のようにある程度成長した種子を、海中や泥中に根付かせて成長する。胎生種子はすべて埋まるように植えつけると、それよりも浅く植えたものよりも成長の具合がよく [18]、胎生種子が大きくなるほど発根本数は増加する [19] ので、根付けの深さと種子の大きさを考慮することで、より実物に近い支柱根形状が再現できる。

## 謝辞

この研究を進めるにあたり、丁寧なご指導や助言ををしていただきました本校メディア学部の渡辺大地先生、ならびに三上浩司先生に感謝いたします。当初はどうなることかと思いましたがなんとかなりました。また、研究中の疑問や質問に答えていただいた研究室の方々並びにゲームサイエンスプロジェクトのみなさん、友人に感謝します。最後に、すねをかじりまくりの両親に最大級の感謝を伝えます。ありがとうございました。

## 参考文献

- [1] Takeo Igarashi, Satoshi Matsuoka, and Hidehiko Tanaka: "Teddy: A Sketching Interface for 3D Freeform Design", SIGGRAPH 1999, pp.409-416.
- [2] 井尻 敬, 高橋 伸柴, 山悦 哉 "スケッチベースの植物のモデリング", 画像電子学会, Visual Computing/グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2004, ポスター発表, pp. 213-218.
- [3] 岡部 誠, 大和田 茂, 五十嵐 健夫, "手書きスケッチと例示予測インタフェースに基づくインタラクティブな 3次元樹木モデルのデザイン手法", 2004 ビジュアルコンピューティング'04 予稿集, pp19-24, 2004.
- [4] 金山 知俊, 阪田 省二郎, 増山 繁 "分枝規則を再現し, 光, ホルモンの影響を考慮した樹木の生長モデル", 電子情報通信学会論文誌 D Vol.J79-D2 No.8 pp.1362-1373
- [5] Interactive Data Visualization, "SpeedTree", <http://speedtree.com/>
- [6] Mech R, Prusinkiewicz P. 1996. Visual models of plants interacting with their environment: In: Proceedings of SIGGRAPH '96 (New Orleans, Louisiana, August 4-9, 1996). New York: ACM SIGGRAPH, 397-410.
- [7] 巽 二郎, "根の形態測定法: フラクタル解析の利用", 日本作物学会紀事, Vol. 76, No.4 , pp.604-609, 2007.



- [8] 武田 知己, 平野 高司, 浦野 真一, 堀口郁夫, ”L システムを用いたヒマワリの形状モデリング”, 農業気象 (J.Agric. Meteorol.) ,57 (3) , pp.145-153, 2001.
- [9] R.Mech and P.Prusinkiewicz, ”Visual Models of Plants Interacting with Their Environment ”, SIGGRAPH96, pp.397 - 410, 1996.
- [10] Jijoon KIM, ”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.
- [11] 馬場 繁幸, 北村 昌三, ”マングローブ植林のための基礎知識 —マングローブ林再生のために—”, 国際緑化推進センター, 1998.
- [12] 中村 武久, 中須賀 常雄 ”マングローブ入門 — 海に生える緑の森”, 株式会社めこん, 1998.
- [13] P.B. Tomlinson, ”The botany of mangroves”. Cambridge University Press, 1986.
- [14] 佐藤 一紘, ”マングローブ林の防災機能に関する研究 (I) : ヤエヤマヒルギの支柱根の形態上の特徴について (林学科) ”, 琉球大学農学部, 琉球大学農学部学術報告, 25号, pp.615-630, 1978.
- [15] 赤萩 進一, ”懸垂線の方程式について—変分法の紹介” 日本評論社, 数学セミナー, 34(4), pp.40-45, 1995.
- [16] 渡辺 大地, ”FK Tool Kit System”, <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>
- [17] イーフロンティア, ”Shade 10.0” <http://shade.e-frontier.co.jp/>
- [18] 梶田 信彌, 福田 香織, 矢口 行雄, 本間 環, ”植え付け深さの違いがメヒルギ胎生種子の成長におよぼす効果”, 木材学会誌, Vol.53, No.6, pp.298-305, 2007.
- [19] 梶田 信彌, 福田 香織, 矢口 行雄, 本間 環, ”メヒルギ胎生種子の大きさの違いが植栽後の成長におよぼす効果”, 木材学会誌, Vol. 54 , No.2, pp.58-67, 2008.