

2009年度 卒業論文

# 生長過程を考慮したツル植物の自動生成の研究

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 M0106121

笠倉 修

**2009年度 卒業論文概要**

**論文題目**

生長過程を考慮したツル植物の自動生成の研究

**メディア学部**

**学籍番号：M0106121**

**氏名**

笠倉 修

**指導  
教員**

渡辺 大地 講師

**キーワード**

3DCG、ツル植物、自動生成、モデリング、生長シミュレート、生長過程

コンピュータグラフィックスの分野では、自然界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。そのため、樹木のモデリングやレンダリングに関する研究が数多くあり、特にモデリングにおける労力軽減やより写実的な表現を目的として研究が行われてきた。しかし、樹木や植物に関する研究では、主に直立する樹木や植物に重点が置かれ、周囲の物体に巻きつくツル植物に関するものは少ない。ツル植物は生長過程に巻きつく先を探し、巻きつく先が見つければ巻きつき、見つからなければ枝分かれをして、また巻きつく先を探す植物である。ツル植物に関する既存研究は周囲の物体に依存した茎の形状変化を表現したもので、より写実的なツル植物を表現するためには生長過程を考慮する必要があった。

そこで本研究では、生長をシミュレートすることで、生長過程における茎の形状変化を考慮したツル植物の自動生成の手法を提案する。ツル植物の巻きつき方には、巻きつき型、巻きひげ型、よじ登り型、寄りかかり型の4種類があり、本研究では、巻きつき型のツル植物を対象とした。ツル植物は様々な支柱に巻きつくため、どのような形状の物体を支柱と設定しても、巻きつくツル植物の形状を生成できる手法を目標とした。より現実の生長を考慮したツル植物の生成を、植物ごとの生長の違いをパラメータ化し、実際に生長をシミュレートすることで自動的にツル植物の3次元形状モデルを生成した。生長のシミュレートは実際に回旋運動や頂芽優勢を行いながら一定時間ごとに生長させる。また、支柱の表面とツルの接触判定を行うことで、どのような形状の支柱に巻きつくツル植物の形状を生成することができた。本研究を実装した結果、様々な形態を持つツル植物を容易に作り出すことができた。

# 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	4
<b>第2章</b>	<b>ツル植物について</b>	<b>5</b>
2.1	ツル植物とは	5
2.2	ツル植物の種類	6
2.2.1	巻きつき型	7
2.2.2	巻きひげ型	7
2.2.3	よじ登り型	8
2.2.4	寄りかかり型	8
2.3	巻きつき型のツル植物	9
2.3.1	回旋運動	9
2.3.2	頂芽優勢	10
<b>第3章</b>	<b>ツル植物の形状生成</b>	<b>12</b>
3.1	考慮するパラメータ	12
3.2	ツル植物の茎の軸を決定	13
3.3	形状生成	15
3.3.1	茎の軸を構成する列点の平滑化	16
3.3.2	面を生成するための頂点を生成	17
3.3.3	葉の位置・形状決定	20
<b>第4章</b>	<b>検証と考察</b>	<b>23</b>
4.1	実装	23
4.2	考察と課題	29
<b>第5章</b>	<b>まとめ</b>	<b>31</b>
	<b>謝辞</b>	<b>33</b>
	<b>参考文献</b>	<b>34</b>

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究背景と目的

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植物や樹木の 3 次元形状モデルを利用している。植物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や写実的な表現を目的として樹木の 3 次元形状モデルを自動的に生成する研究が行われてきた。

樹木の 3 次元形状モデルの生成に関する研究は様々なものがある。桑原ら [1] によるフラクタルと呼ばれる分岐法則を利用し樹木の枝分岐を生成する手法、千葉ら [2] による周りの環境を適用し生成する手法や Mech ら [3] による植物ホルモンを適用し生成する手法、WEBER ら [4] によるパラメータを設定し、パラメータに基づいた樹木の 3 次元形状モデルを生成する手法などがある。また、実写画像を元に樹木の 3 次元形状モデルを求める手法も様々なものがある [5][6][7]。3DCG ソフトの Maya の Paint Effects といった 3 次元モデルライブラリを利用する手法もある。しかし、これら樹木や植物生成に関する研究では、主に直立する樹木や植物に重点が置かれており、ツル植物などの絡みつきながら生長する植物の研究は余りなされていない。図 1.1 と図 1.2 はそれぞれ直立した植物とツル植物の例である。



図 1.1: 直立した植物



図 1.2: ツル植物

ツル植物は、自立せず他の植物や支柱に絡みつきながら光を得るために上へ伸びて生長し、自体では直立できず、他の植物や環境に影響され形状が変化する植物である。ガーデニングにおいては、壁やフェンスに絡ませることによって景観の硬い印象を柔らかくし、華やかな印象を与えるなど重要な要素を担っている [8]。また、手入れをしていない雑木林に絡まる植物などの風景に良く見る事ができる。

このような風景の表現を行う際、他の物体に絡みつくツル植物の 3次元形状モデルを生成するためには、周辺物体の形状を生長過程に判断し、その結果を考慮する必要がある。このため、ツル植物の 3次元形状モデルをより写実的に表現するためには、生長過程を考慮しながら手作業で生成する必要があった。そのため、生長過程を考慮したツル植物の 3次元形状モデルの生成には多大な労力が必要である。

古屋ら [9] による手法では支柱を用意し、その支柱に沿った形でツル植物の 3次元モデルの生成をしている。用意する支柱には大きな制約があり、1本の折れ線に沿った支柱でなければならない。しかし、ツル植物は T 字や格子状の柵などにも巻きつくため、T 字や格子状の柵を支柱と設定してもツル植物を生成できるようにする必要がある。ツル植物が生長している過程に周囲の物体の形状を判断し枝分かれや巻きつきを行うが、古屋らの研究では枝分かれを考慮していない。また、古屋らの手法を用いて生成したツル植物の巻きつく茎の 3次元モデルは滑らかで

はなく、不均一にカクカクしている。実際のツル植物は支柱の表面に沿ってなだらかに巻きつく為、より写実的な3次元形状モデルを生成するためには処理を加える必要がある。よって、巻きつきも十分に考慮されているとは言えない。図1.3と図1.4はそれぞれ古屋らによる手法により巻きつける支柱と巻きつけない支柱を示している。

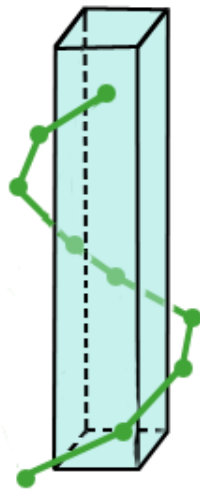


図1.3: 巻きつける支柱



図1.4: 巻きつけない支柱

他にも、Luft[10]によるツル植物の1種であるツタの自動生成に関するソフト「An Ivy Generator」がある。これは、ユーザが用意した3次元形状モデルを支柱とし、パラメータを調整することにより、ツタの形状を自動生成するものである。しかし、ツタは吸盤や吸着根を用いて壁などをよじ登るツル植物であり、巻きつくツル植物には適用出来ない。また、Zhouら[11]によるテクスチャーを連続的に用いて物体を覆う3次元形状モデルの生成によりツル植物を生成する手法がある。ツル植物は生長している芽である頂芽から数えて2つ分の節が回転し、回転している部分が支柱に当たるとそこに巻きつき、子葉と子葉から数えて1節間又は2節間分は巻きつかない回旋運動と呼ぶ性質を有する。また、頂芽から数えて2つ分の節が支柱に当たることがない時、その頂芽は生長を止め、より根に近い側芽を新たな頂芽とし優先的に生長させる頂芽優勢と呼ぶ性質を有する。この手法ではテクスチャーを元に形状を連続的に生成しているため、回旋運動や頂芽優勢を考

慮しないものとなっている。

そこで本研究では、3DCGでの生長過程を考慮したツル植物の形状を自動生成する手法を提案する。より現実の生長を考慮したツル植物の3次元形状モデルの生成を、植物ごとの生長の違いをパラメータ化し、実際に生長をシミュレートすることにより、自動的にツル植物の3次元形状モデルを生成した。また、ツル植物は様々な支柱に巻きつくため、どのような形状の物体を支柱と設定しても、巻きつくツル植物の形状を生成できる手法を目標とした。生長シミュレートの手順は以下の通りである。まず、ツル植物の生長に影響するパラメータを設定し、ツル植物の生長のシミュレートに基づいた茎の軸を決定する。次に3次元形状モデルの生成に影響するパラメータを設定し、最後にツル植物の3次元形状モデルを生成する。生長シミュレートは実際に回旋運動や頂芽優勢を行いながら一定時間ごとに生長させ、これにより生長過程によるツル植物の形状の違いを表現した。また、本手法を用いて生長過程に関わるパラメータを様々な設定に変更し、巻きつくツル植物の形状を生成した。この結果、様々なツル植物の3次元形状モデルを容易に生成出来る事が確認できた。生長シミュレートにおいて支柱に巻きつく際、支柱の表面とツルの接触判定を行うことで、どのような形状の支柱にも巻きつくツル植物の3次元形状モデルを生成することができた。回旋運動や頂芽優勢による形状の違うツル植物を生成することができ、本手法について有効性を確認した。これにより、容易により写実的に、どの様な支柱が巻きつく対象となってもツル植物の3次元形状モデルの生成が可能となった。

## 1.2 本論文の構成

本論文の構成は、まず第2章で実際のツル植物の種類と特徴について記述する。第3章では、本研究で用いる形成方法について述べる。第4章では、実装した結果の評価、今後の展望や課題を述べ、最後の章で本研究のまとめを記す。

## 第 2 章

# ツル植物について

### 2.1 ツル植物とは

ツル植物とは、茎全体が他の物体に巻きつきや寄りかかりにより、自重を支えて、光合成に有利な高いところに伸びていく植物のことである。直立する植物は、自重を支える丈夫な茎が必要であり、茎を太く丈夫にするため、多くの栄養が必要とする。だが、ツル植物は他の物体に自重を支えてもらうため、茎が太く丈夫である必要がない。その為、長く伸びるために栄養を使うことができ、生長が早い [12]。

植物一般は草本や木本の 2 つに大別でき、ツル植物も草本のツル植物と木本のツル植物がある。草本 [13] とは、種をまいた後枯れてしまい木のように硬くならない植物のことである。木本とは茎が硬くなり長く存続する植物である。草本には 1 年生、多年生などの生長過程の違いがある。1 年生草本は、芽を出し種子をつけて枯れるまでが 1 年より短い植物である。多年生草本 [14] は、枯れるまでに 3 年以上かかる植物である。多年生草本は、条件次第では長く生き続けることができ、茎が硬くなり木本のようにも見えるものもや常緑性という 1 年間、どの季節にも葉が付いている性質を持つものもある。また、常緑樹 [15] や落葉樹などと言った季節による違いを持つ木本植物も存在する。常緑樹とは常緑性を持つ樹木で、落葉樹とは冬や乾期などに葉がついていない時期がある樹木である。図 2.1 は木本のツル植物、図 2.2 は草本のツル植物の様子である。





図 2.1: 草本



図 2.2: 木本

ツル植物は、茎と葉を持ち、葉は茎から生えるといった植物全般と同じ性質を持っている。その葉の生えている茎の部分を節と呼び、節と節の間を節間と呼ぶ。生長中の芽のことを頂芽と呼び、ツル植物の頂芽が巻きつく先を見つけられなかった場合や動物に食べられるなどして頂芽が失われた時、新たな頂芽となる芽を側芽と呼ぶ。側芽は節にできる。1つの節に同時に葉の付く枚数ごとに分類があり、1節に1個の葉がつくことを互生葉序、1節に2個の葉がつくことを対生葉序、1節に2個以上の葉がつくことを輪生葉序という。また、種から芽が出て初めて生える葉を子葉と呼び、子葉が1枚葉のものを単子葉類、2枚葉のものを双子葉類と呼ぶ。以上のようにツル植物と一概に言っても性質や形状などは様々である。

## 2.2 ツル植物の種類

ツル植物は、さまざまな方法で周囲のものに巻き、光合成に有利な高いところへ生長しようとする生態戦略を持つ。ツル植物が他の植物に巻きつく方法は大きく分けて4種類存在する。巻きつき型、巻きひげ型、よじ登り型、寄りかかり型である。これらの型を複数合わせ持ったツル植物もある。巻きつき方の特徴を以下に記す。

### 2.2.1 巻きつき型

巻きつき型は、主軸となる茎が巻きついて伸びていく。図2.3は巻きつき型のツル植物の様子である。



図 2.3: 巻きつき型

### 2.2.2 巻きひげ型

巻きひげ型は、主軸となる茎は巻きつかずに巻きひげという茎や葉が変化したものを出して周囲に絡みつけて茎を支える。図2.4は、巻きひげ型のツル植物の様子である。



図 2.4: 巻きひげ型

### 2.2.3 よじ登り型

よじ登り型は、ツルから付着根という根や吸盤を出して壁などに張り付いていく。以下の図2.5は付着根を持つよじ登り型のツル植物を示している。また、図2.6は吸盤を持つよじ登り型のツル植物の様子である。

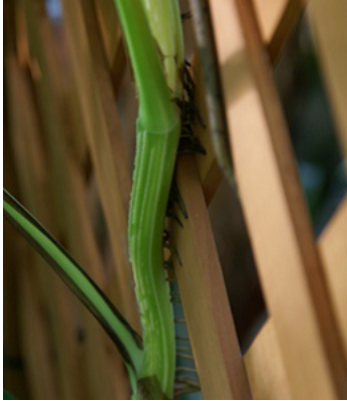


図 2.5: よじ登り（付着根）型



図 2.6: よじ登り（吸盤）型

### 2.2.4 寄りかかり型

寄りかかり型は、茎に生えたとげを引っ掛けながら伸びていく。図2.7は、寄りかかり型のツル植物の様子である。茎全体に生えている毛のようなとげを見る事ができる。



図 2.7: 寄りかかり型

## 2.3 巻きつき型のツル植物

ツル植物には、巻きつき型、巻きひげ型、よじ登り型、寄りかかり型の4種類あるが、本研究では巻きつき型のツル植物を対象とする。茎の巻き方はそれぞれ植物の種類によって決まり、右巻きと左巻き、又はその両方の巻き方をする。右巻きか左巻きかの判定は、上から見た方向 [16] と下から見た方向 [15] の両方が用いられる。本研究では、下から見て時計回りになるものを右巻き、反時計回りになるものを左巻きと定義する。図2.8は右巻き、図2.9は左巻きを示しており、定義した巻き方である。

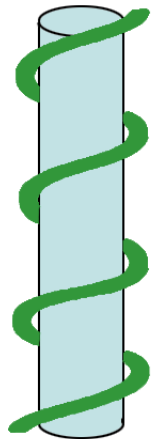


図 2.8: 右巻き

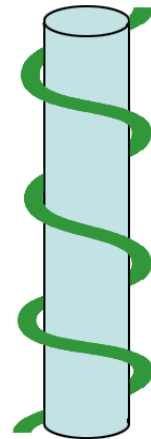


図 2.9: 左巻き

### 2.3.1 回旋運動

ツル植物が物に巻きつくとき、茎の先端が円を描く様に先端が回転する運動を回旋運動と呼ぶ。これは側面重力屈性という茎の片側の生長が早くなる習性によるものであり、回旋運動をしながら巻きつくための支柱を探して伸びていき、何かに当たるとそれに巻き付く [17]。回旋運動はツル植物の種類ごとに、角度・速度・方向が異なり [18]、巻きつく方向と回旋運動の方向は同じになる。回旋運動は頂芽から数えて節間2つ分で行い、支柱を見つける事が出来なかったツルは、生長を緩め、別のツルに栄養を回す。また、回旋運動の角度よりも支柱の傾きが大

きい場合は自身の力で巻きつくことはしない。実際は、重力や風、人の手などの周辺から物理的な干渉を受け、巻きつく場合がある。しかし、より直立な支柱に巻き付く為、過度な干渉が無い限り回旋運動の角度の範囲内の支柱に巻きつく。図 2.10 は回旋運動の様子である。



図 2.10: 回旋運動

### 2.3.2 頂芽優勢

優先的に頂芽が生長することを頂芽優勢 [17] と呼び、頂芽優勢が現在の頂芽から側芽に移り、その側芽を新たな頂芽とすることを頂芽優勢を打破したと呼ぶ。頂芽優勢の打破が起きる理由は2つある。1つはツル植物特有の現象であり、支柱が短すぎて頂芽が先端まで上りきってしまったたり、風に吹かれてツルが支柱から外れてしまったときなど、巻きつく先が見つからない場合に起こる。このケースで頂芽優勢の打破が起きた場合、その時点での頂芽は生長を止め、代わりに側芽が頂芽となり生長を始める。2つ目は植物全般に共通し、動物に食べられるなどの理由により頂芽を失った場合に起こる。どちらの場合も根元付近の側芽を新たな頂芽とし、伸び始める。図 2.11 と図 2.12 はそれぞれ頂芽優勢の打破が起きる前と頂芽優勢の打破が起きた後の様子である。

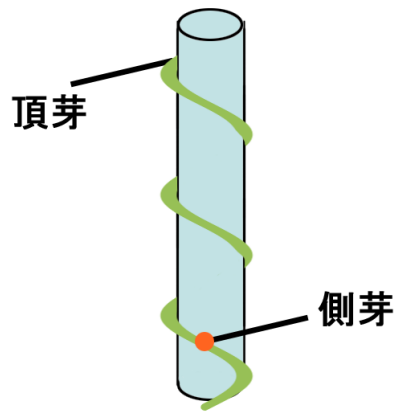


図 2.11: 頂芽優勢の打破が起きる前

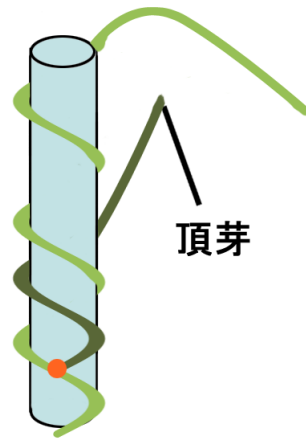


図 2.12: 頂芽優勢の打破が起きた後

## 第 3 章

# ツル植物の形状生成

様々な形状を持つツル植物の中でも、本研究では巻きつき型のツル植物の 3 次元形状モデルを生成する為にシミュレーションを行う。シミュレータのユーザが生長過程に関わるパラメータを設定し、ツル植物の茎の生長をシミュレートし、その結果に基づいた 3 次元形状モデルを生成する。本研究では以下の手順でツル植物の 3 次元形状モデルを生成する。まず、ツル植物の生長に影響するパラメータを設定し、ツル植物の生長のシミュレートに基づいた茎の軸を決定する。次に 3 次元形状モデルの生成に影響するパラメータを設定し、最後にツル植物の 3 次元形状モデルを生成する。また、本研究では左手系のワールド座標系 [19] を用いて、 $y$  軸の  $+y$  方向を上とする。

### 3.1 考慮するパラメータ

ツル植物を生成するいくつかのパラメータを設定する。パラメータの設定は 2 段階に分かれており、まず茎の生長のシミュレートに必要なパラメータを設定する。その後に、葉や質感といった 3 次元形状モデルを決定するためのパラメータを設定する。表 3.1 にツル植物の生長に影響するパラメータと 3 次元形状モデルの生成に影響するパラメータを示す。

表 3.1: 考慮するパラメータ

ツル植物の生長に影響	3次元形状モデルの生成に影響
節間の長さ	茎の質感
茎の半径	葉の質感
生長経過時間	葉の枚数
角度	子葉の枚数
巻きつかない節の数	葉の大きさ
巻きつく方向	

ツル植物の生長に影響するパラメータに関して、節間の長さ  $l$ 、茎の半径  $r$ 、生長経過時間  $t$ 、角度  $\theta_p$ 、巻きつかない節の数  $U$ 、巻きつく方向をそれぞれユーザが設定する。生長経過時間とは茎が生長する時間間隔を示す。角度は回旋運動によって茎が回転する部分の  $y$  軸と茎のなす角を示す。巻きつかない節の数は回旋運動しない節の数を示す。巻きつく方向は右か左かを設定する。

3次元形状モデルの生成に影響するパラメータに関して、茎の質感、葉の質感、葉の枚数、子葉の枚数、葉の大きさ  $\gamma$  をそれぞれユーザが設定する。茎の質感と葉の質感の設定は本研究ではテクスチャーとマテリアルのセットを用意し、どのセットを使うかを示す。互生葉序か、対生葉序か、葉を付けないかを葉の枚数により示す。単子葉類か、双子葉類のどちらかを子葉の枚数により示す。葉の大きさは葉を正方形に生成する際の対角線の半分の長さを示す。

## 3.2 ツル植物の茎の軸を決定

ツル植物の茎の3次元形状モデルを生成する際に、頂点位置を決定するための茎の軸を決定する。茎の軸は順番を有する列点で構成し、構成する点  $L_i$  は位置ベクトル  $\mathbf{P}_i$  と茎の生長方向を示す単位方向ベクトル  $\mathbf{N}_i$  を有する。 $i$  は列点の要素番号を示し、0 から番号を振り、末番号は  $f$  とする。節間を  $d$  個に分割し、節間の長さを  $l$ 、茎の半径を  $r$ 、巻きつかない節の数を  $U$ 、生長経過時間を  $t$  とする。茎の生長のシミュレートに従って  $L_i$  を新たに配置する。一定時間ごとに  $f$  に 1 足し、 $+y$  方向に  $\frac{l}{d}$  離れた位置に  $L_f$  を配置していく。 $L_f$  は  $L_{f-1}$  を配置してから時間が  $t$



経過したときに新たに配置する。 $L_i$  の中でも  $i$  が 0 と  $d$  の倍数の場合は節を示す。  
 図 3.1 は  $L_i$  の配置を示したものである。

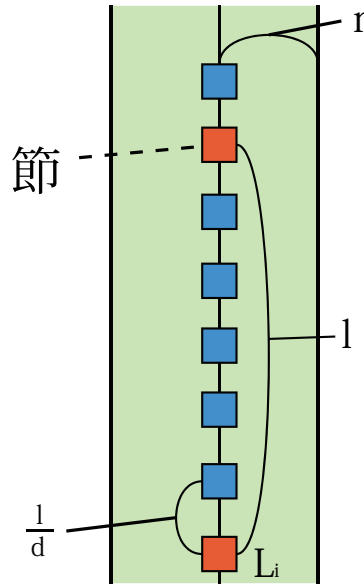


図 3.1: 茎の軸を構成する列点の配置

$i = 0$  以外のとき、 $\mathbf{P}_i$  と  $\mathbf{P}_{i-1}$  は式 (3.1) となる位置関係を保つ。

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{P}_{i-1} + \frac{l}{d}\mathbf{N}_{i-1} \quad (3.1)$$

この相対的な位置関係を保ちつつ回旋運動を行う。 $i = Ud$  の時に回旋運動を始め、この時の  $i$  を  $k$  とし、 $\mathbf{N}_k$  を回転する。 $\mathbf{N}_k$  から  $\mathbf{N}_f$  は全て  $\mathbf{N}_k$  と同じ方向ベクトルを設定する。回転には茎と  $y$  軸とのなす角、 $y$  軸の周りの回転量を用いる。茎と  $y$  軸とのなす角がパラメータで入力した角度  $\theta_p$  となる様に設定し、 $y$  軸の周りの回転量は  $-180^\circ$  から  $180^\circ$  の値を取る。ツル植物は回旋運動をしている部分が周囲の物体に当たると巻きつき、当たった部分を起点に再び回旋運動を行う。その為、当たり判定は支柱の表面と  $f - k$  個の半径  $r$  の球の表面で行い、球の中心点はそれぞれ  $\mathbf{P}_{k+1}$  から  $\mathbf{P}_f$  を用いる。当たり判定を行い球が接触した場合、接触した

球の中心点を示す  $P_i$  の  $i$  を  $k$  とし、再び  $N_k$  を回転する。図 3.2 は回転の様子である。

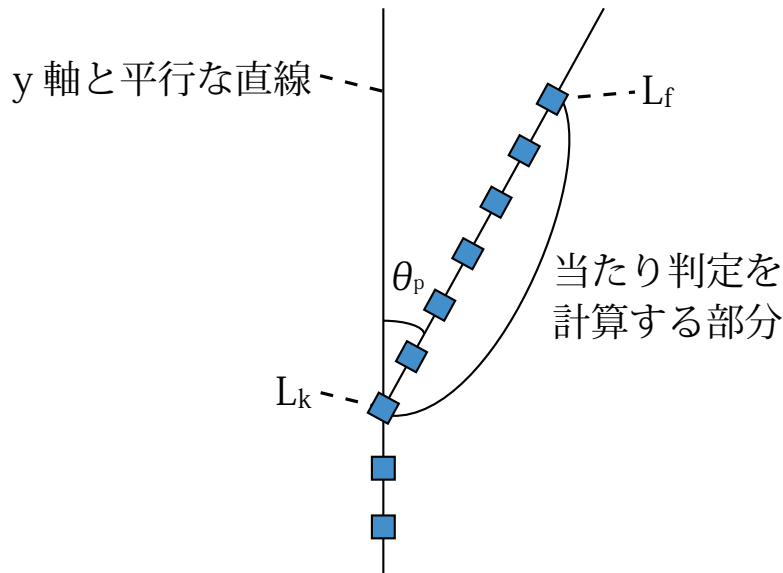


図 3.2: 回転の様子

優先的に頂芽が生長をすることを頂芽優勢と呼ぶ。回旋運動をしたときに、頂芽から 2 節間分支柱に接触しなかった場合はその頂芽の生長を止め、根に近い節から順に新たな頂芽を生成し、生長を始め、このことを頂芽優勢が打破されると呼ぶ。シミュレートにおいて初めて頂芽優勢が打破された場合、巻きつかない節の次の節  $L_n$  を頂芽とする。  $n = (U + 1)d$  であり、これは巻きつかない節の数  $U$  と子葉の生えている節を足すことによって決定する。以降、頂芽優勢が打破されるごとに  $n$  の値に  $d$  を足し、その時の  $P_n$  を頂芽の位置とする。以上の処理を繰り返して行うことで茎の軸を決定する。

### 3.3 形状生成

3.2 節で用いた  $L_i$  と 3 次元形状モデルの生成に影響するパラメータを元に 3 次元形状モデルの生成を行う。本研究では以下の手順でツル植物の 3 次元形状モデ

ルを生成する。3次元形状モデルの生成に影響するパラメータである茎の質感、子葉の枚数、葉の枚数、葉の質感、葉の大きさを変更した場合は、再度以下の手順を1から行う。

1. シミュレートにより決定した  $L_i$  の取得。
2.  $L_i$  の方向ベクトルに急な変化がある部分を平滑化する。
3. 巻きついていない部分の  $L_i$  の位置をランダムに変更する。
4.  $L_i$  に手順2、3の処理を加えた  $L'_i$  に沿ってポリゴンを張る。
5. 葉の位置を  $L'_i$  から取得。
6. 葉の形状を決定しポリゴンで生成する。

手順1~3は3.3.1項で、手順4は3.3.2項で、手順5,6は3.3.3項でそれぞれについて述べる。

### 3.3.1 茎の軸を構成する列点の平滑化

ツル植物は支柱に滑らかに巻きつく植物であり、茎の軸にそのまま沿った3次元形状モデルを生成してしまうと茎に滑らかでない部分が出来てしまう。その為、滑らかでない部分を平滑化する必要がある。まず、 $\mathbf{N}_i$  の  $y$  軸周りの回転量と  $\mathbf{N}_{i-1}$  の  $y$  軸周りの回転量との差が  $45^\circ$  以上の部分を抽出し、その時の  $i$  を  $C$  とする。その前後の位置情報から3次スプライン補間 [20] をし、 $\mathbf{P}_i$  を平滑化する。同時に  $\mathbf{N}_i$  も平滑化する。方向ベクトルの平滑化は  $y$  軸周りの回転量を平滑化することで行い、式 (3.2) を用いる。 $\alpha$  は平滑化する  $L_i$  の  $i$  を表し、 $C - \frac{d}{2}$  から  $C + \frac{d}{2}$  まで順に平滑化していく。 $H_\alpha$  は  $y$  軸周りの回転量を、 $H'_\alpha$  は平滑化した  $y$  軸周りの回転量を、 $d$  は節間の分割数をそれぞれ示す。 $d$  が奇数となる場合は  $d$  の値から1を引き、偶数とする。これにより、支柱に沿った形で茎の軸を滑らかなに平滑化することが出来る。

$$\begin{aligned}
H'_\alpha &= (1 - \beta)H_{C-\frac{d}{2}} + \beta H_{C+\frac{d}{2}} \\
\beta &= \frac{\alpha - (C - \frac{d}{2})}{d}
\end{aligned}
\tag{3.2}$$

巻きつかない部分に関しては3次ベジェ曲線 [21] を利用し、ランダムに  $\mathbf{P}_i$  を変更する。ベジェ曲線は頂芽優勢を打破した頂芽、子葉と巻きつかない節間1つ又は2つ分の  $\mathbf{P}_i$  に適用し、式 (3.3) を用いる。  $U$  は巻きつかない節間の数を示す。  $j$  は平滑化する  $\mathbf{P}_i$  の  $i$  を示し、子葉と巻きつかない節間を平滑化する場合は0から  $(U+1)d$  まで、打破した頂芽を平滑化する場合は  $J-2d$  から  $J$  まで順にランダムに  $\mathbf{P}_i$  を変更していく。  $\mathbf{P}'_j$  は  $\mathbf{P}_i$  をベジェ曲線を用いて変更した位置ベクトルを示す。  $s, e$  それぞれは子葉と巻きつかない節間を平滑化する場合では0、  $(U+1)d$  を示し、打破した頂芽を平滑化する場合では  $J-2d, J$  を示す。  $d$  は節間の分割数を示す。  $J$  は頂芽優勢が打破された時の  $i$  を示す。子葉と節間1つ分又は2つ分の  $\mathbf{P}_i$  をランダムに変更する場合は、  $\mathbf{P}_{s+d}$  をランダムに変更し、頂芽優勢を打破した頂芽の場合は  $\mathbf{P}_{e-d}$  と  $\mathbf{P}_e$  をランダムに変更する。ランダムの変更は節間の長さ  $l$  を用いて  $\frac{-5l}{d}$  から  $\frac{5l}{d}$  の間の値を取るようなランダムな数値を  $x, z$  成分に加える。

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}'_j &= (1 - \beta)^3 \mathbf{P}_s + 3(1 - \beta)^2 \beta \mathbf{P}_{s+d} + 3(1 - \beta) \beta^2 \mathbf{P}_{e-d} + \beta^3 \mathbf{P}_e \\
\beta &= \begin{cases} \frac{j}{2d} & (\text{子葉と節間1つ分又は打破した頂芽のとき}) \\ \frac{j}{3d} & (\text{子葉と節間2つ分のとき}) \end{cases}
\end{aligned}
\tag{3.3}$$

### 3.3.2 面を生成するための頂点を生成

3.3.1 項で平滑化した  $L'_i$  を用いて面を貼るための頂点を決定する。  $L'_i$  の位置ベクトル  $\mathbf{P}'_i$ 、茎の太さ  $r$ 、分割数  $a$  で構成する。分割数とは側面をいくつの面にわけるとい値である。茎の1周分の頂点を配置するためにオブジェクト座標系

[19]を用いるためまず、オブジェクト座標系の定義をする。オブジェクト座標系を定義するために、ワールド座標系の  $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸それぞれと同じ方向を示す  $x'$  軸、 $y'$  軸、 $z'$  軸を設定する。 $x'$  軸、 $y'$  軸、 $z'$  軸それぞれを、 $x$  についての回転行列  $\mathbf{R}_i^x(\theta_x)$  と  $z$  についての回転行列  $\mathbf{R}_i^z(\theta_z)$  を用いて回転する。 $\theta_x$ 、 $\theta_z$  はそれぞれ  $x$ 、 $z$  についての回転角を示し、その時の  $x'$  軸、 $y'$  軸、 $z'$  軸それぞれの方向は  $L'_i$  におけるオブジェクト座標系の  $x$  軸、 $y$  軸、 $z$  軸の方向を示すものである。また、 $L'_i$  におけるオブジェクト座標系の原点は  $\mathbf{P}'_i$  である。茎の1周分の頂点は  $L'_i$  の定義したオブジェクト座標系の  $xz$  平面上に沿って配置する。 $a$  は1周の頂点を表し、0から  $M$  まで順に作っていく。 $i$  は  $L'_i$  の要素番号を表し、0から  $I$  まで順に作っていく。 $r$  は茎の半径を表し、 $\theta$  は角度を表し  $\theta = \frac{360^\circ}{M}$  である。図3.3はオブジェクト座標における  $y$  軸から各茎の頂点の位置を示している。この時の頂点  $\mathbf{S}_{a,i}$  は式(3.4)を用いる。 $\mathbf{S}_{a,i}$  はオブジェクト座標系における頂点であるため、これをワールド座標系の原点から見た座標に変換する。ワールド座標系における頂点位置  $\mathbf{S}'_{a,i}$  を式(3.5)により求める。図3.4は茎を構成している頂点を示している。

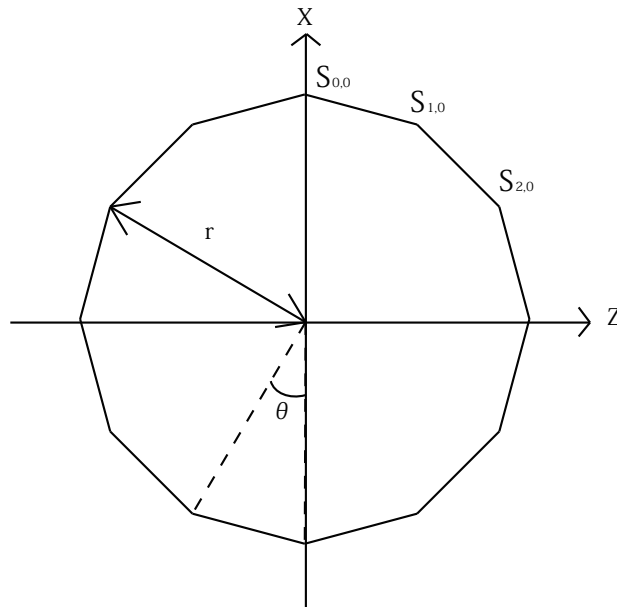


図3.3:  $y$  軸から見た1周の頂点配置

$$\mathbf{S}_{a,i} = (r \cos(a\theta), 0, r \sin(a\theta))$$

$$a = 0, 1, 2, 3, \dots, M$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, I$$

(3.4)

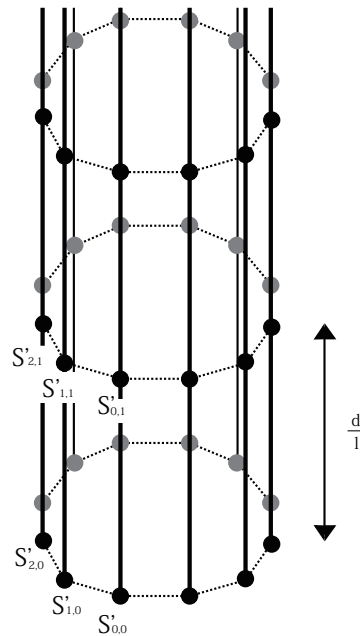


図 3.4: 茎を構成している頂点

$$\mathbf{S}'_{a,i} = \mathbf{P}'_i + \mathbf{R}_i^z(\theta_z) \cdot \mathbf{R}_i^x(\theta_x) \cdot \mathbf{S}_{a,i}$$

$$a = 0, 1, 2, 3, \dots, M$$

$$i = 0, 1, 2, 3, \dots, I$$

(3.5)

形状を作る頂点が決定したら、面を貼っていく。

### 3.3.3 葉の位置・形状決定

3.3.1項で平滑化した  $L'_i$  を用いて面を貼るための頂点を決定する。葉の形状に影響するパラメータは子葉の枚数、葉の枚数、葉の大きさによる。葉の質感はテクスチャーとマテリアルのセットを用意し、どのセットを使うかを入力する。葉の頂点を  $L'_i$  の 3.3.2 項に用いたオブジェクト座標系の  $xz$  平面上に沿って配置する。葉の頂点位置を決定するため、互生葉序や子葉が1枚の場合は式 (3.6) を用いる。図 3.5 は構成している頂点配置の互生葉序や子葉が1枚の場合を示している。

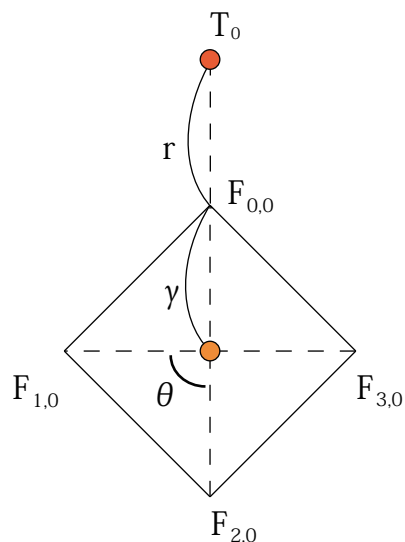


図 3.5: 葉を構成している頂点 互生葉序・子葉が1枚の場合

$$\begin{aligned}
 \mathbf{F}_{g,h} &= (\gamma \cos(g\theta) + \gamma + r, 0, \gamma \sin(g\theta)) \\
 g &= 0, 1, 2, 3 \\
 h &= 0, 1, 2, 3, \dots, Q
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

$\gamma$  は葉の大きさ、 $r$  は茎の半径の大きさ、 $\mathbf{F}_{g,h}$  は葉の頂点位置、 $\mathbf{T}_h$  は  $\mathbf{P}_i$  の中でも節の位置ベクトルを表す。 $\theta$  は角度を表し、 $\theta = 90^\circ$  である。葉は4角形で構成

し、 $g$  は4角形の4頂点を表し、0から3まで順に作っていく。 $h$  は節の数を表し、0から $Q$ まで順に作っていく。頂芽優勢の打破が起き、新たな頂芽となった節の葉の頂点計算は行わない。また  $\mathbf{F}_{g,h}$  はオブジェクト座標系における頂点であるため、これをワールド座標系の原点から見た座標に変換する。ワールド座標系における頂点位置  $\mathbf{F}'_{g,h}$  を  $L'_h$  の回転行列  $\mathbf{R}_h^z(\theta_z)$ 、 $\mathbf{R}_h^x(\theta_x)$  を用いて、式 (3.7) により求める。 $\theta_x$ 、 $\theta_z$  はそれぞれ  $x$ 、 $z$  についての回転角を示す。

$$\begin{aligned}\mathbf{F}'_{g,h} &= \mathbf{T}_h + \mathbf{R}_h^z(\theta_z) \cdot \mathbf{R}_h^x(\theta_x) \cdot \mathbf{F}_{g,h} \\ g &= 0, 1, 2, 3 \\ h &= 0, 1, 2, 3, \dots, Q\end{aligned}$$

(3.7)

対生葉序や子葉が2枚の場合は式 (3.8) を用いる。図 3.6 は構成している頂点配置の対生葉序や子葉が2枚の場合を示している。

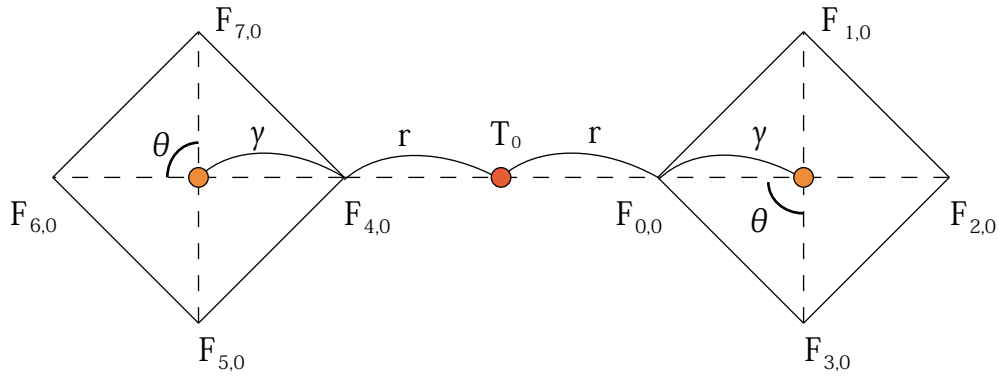


図 3.6: 葉を構成している頂点 対生葉序・子葉が2枚の場合



$$\begin{aligned}
\mathbf{F}_{g,h} &= (\gamma \cos(g\theta + w), 0, \gamma \sin(g\theta + w) + b) \\
g &= 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \\
h &= 0, 1, 2, 3, \dots, Q
\end{aligned}
\tag{3.8}$$

$\gamma$ 、 $r$ 、 $\mathbf{F}_{g,h}$ 、 $\mathbf{T}_h$ 、 $\theta$ 、 $h$ は式(3.6)に用いたものを扱う。葉は4角形で構成し、 $g$ は2つの4角形の頂点を表し、0から7まで順に作っていく。 $g$ が0から3の場合は $w = 90^\circ$ 、 $b = \gamma + r$ であり、 $g$ が4から7の場合は $w = -90^\circ$ 、 $b = -\gamma - r$ である。頂芽優勢の打破が起き、新たな頂芽となった節の葉の頂点は $g$ が4から7の場合、計算を行わない。パラメータで葉の枚数を0と設定した場合は葉の位置、形状決定の計算を行わず、葉を生成しない。また、 $\mathbf{F}_{g,h}$ はオブジェクト座標系における頂点であるため、これをワールド座標系の原点から見た座標に変換する。ワールド座標系における頂点位置 $\mathbf{F}'_{g,h}$ を $L'_h$ の回転行列 $\mathbf{R}_h^z(\theta_z)$ 、 $\mathbf{R}_h^x(\theta_x)$ を用いて、式(3.9)により求める。 $\theta_x$ 、 $\theta_z$ はそれぞれ $x$ 、 $z$ についての回転角を示す。

$$\begin{aligned}
\mathbf{F}'_{g,h} &= \mathbf{T}_h + \mathbf{R}_h^z(\theta_z) \cdot \mathbf{R}_h^x(\theta_x) \cdot \mathbf{F}_{g,h} \\
g &= 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \\
h &= 0, 1, 2, 3, \dots, Q
\end{aligned}
\tag{3.9}$$

形状を作る頂点が決定したら、葉の裏と表に別々のテクスチャーを貼るため両面貼る。

# 第 4 章

## 検証と考察

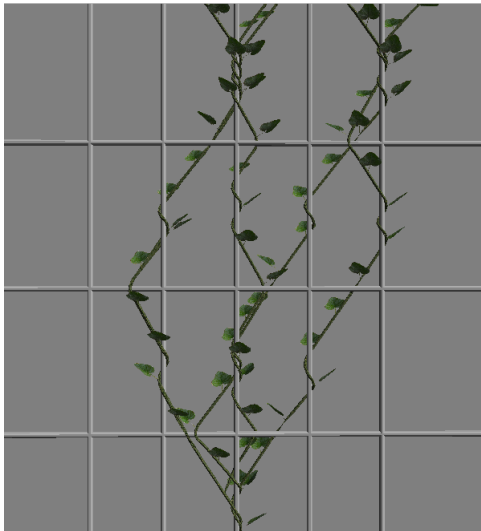
### 4.1 実装

3章で述べたツル植物の3次元形状モデルの生成を3DグラフィックツールキットであるFK System[22]を用いて実装を行った。図4.1は3章で述べた手法で生成したツル植物の3次元形状モデルである。パラメータによって様々なツル植物を作ることが出来た。



図 4.1: ツル植物の生成

図4.2は巻きつける支柱を変えた場合の結果の様子である。図4.2(a)は十字型の支柱の表面にツル植物を巻きつけて生成した結果の様子である。図4.2(b)は既存のモデリングソフトで制作した3次元形状モデルを読み込み、その辺にツル植物を巻きつけて生成した結果の様子である。これにより、どのような支柱にも巻きつきのシミュレーションが実現できていることが分かる。



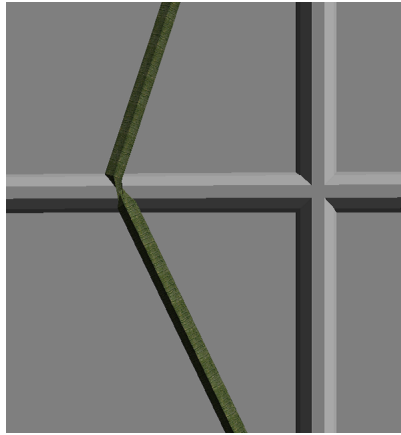
(a) 十字型の支柱に巻きつけた場合



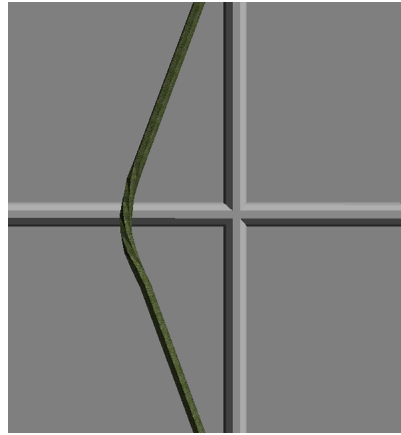
(b) 3次元形状の辺に巻きつけた場合

図4.2: 違う支柱に巻きつけた様子

図4.3は生長をシミュレートしている最中に出来る茎の軸が急激な変化をする部分を平滑化する前と平滑化した後の比較を示す。図4.4は頂芽優勢をした頂芽、子葉と節間1つ又は2つ分の茎をランダムに曲線的な流れに変形する前と変形した後の比較を示す。これにより茎の流れを滑らかにすることができた。



茎の軸を平滑化する前



茎の軸を平滑化した後

図 4.3: 平滑化



茎の軸を変形する前



茎の軸を変形した後

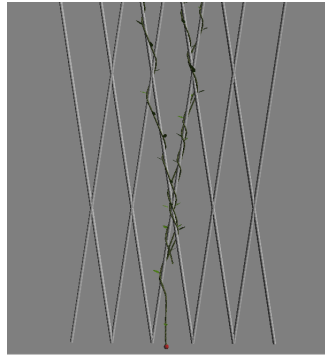
図 4.4: 曲線的に変形

図 4.5 は生長に関するパラメータを変更して自動生成したものである。図 4.5(a) は本手法により生成したツル植物の基本形状を示す。表 4.1 は図 4.5(a) の基本形状を生成する際に用いたパラメータを示す。図 4.5(b) は節間の長さの設定を 100 に変更し、生成したツル植物の形状を示す。節間を長く設定すると、葉と葉の間が長くなっているのがわかる。図 4.5(c) は茎の半径の設定を 4 に変更し、生成したツル植物の形状を示す。図 4.5(d) は巻きつく方向の設定を右に変更し、生成したツル植物の形状を示す。図 4.5(e) は生長経過時間の設定を基本形状の成長速度より早い 5 に変更し、生成したツル植物の形状を示す。生長経過時間を早く設定す

ると、ツル植物が巻きついている場所から、より離れた場所に巻きついているのがわかる。図 4.5(f) は角度設定を  $30^\circ$  に変更し、生成したツル植物の形状を示す。角度を大きく設定すると、ツル植物の左右への広がりが大きくなり、上下の巻きつく間隔が狭くなっているのがわかる。図 4.5(g) は巻きつかない節の数の設定を 2 に変更し、生成したツル植物を示す。巻きつかない節の数を多く設定すると、子葉近くの巻きつかない茎が長くなっているのがわかる。

表 4.1: 図 4.5(a) の基本形状のパラメータ

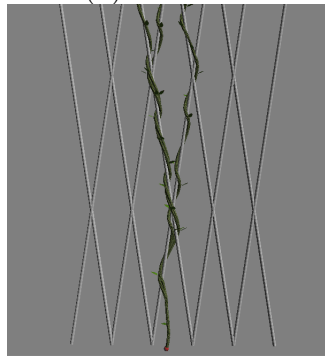
生長に関するパラメータ	設定	3次元形状モデルに関するパラメータ	設定
節間の長さ	60	茎の質感	パターン 1
茎の半径	2	葉の質感	パターン 1
巻きつく方向	左	葉の枚数	1
生長経過時間	10	子葉の枚数	1
角度	$18^\circ$	葉の大きさ	12
巻きつかない節の数	1		



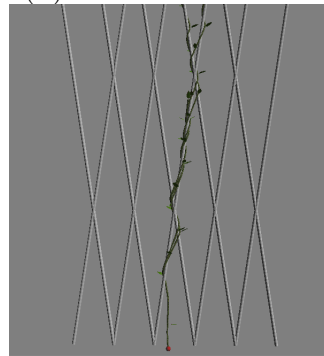
(a) 基本形状



(b) 節間の長さを変更



(c) 茎の半径を変更



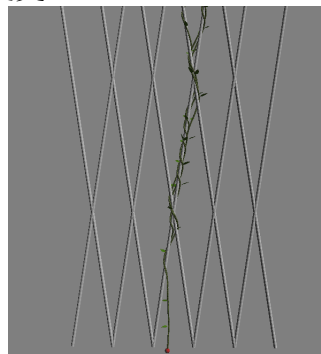
(d) 巻きつく方向を変更



(e) 生長経過時間を変更



(f) 角度を変更



(g) 巻きつかない節の数を変更

図 4.5: 生長に関するパラメータを変更

図 4.6 は 3次元形状モデルの生成に影響するパラメータを変更して自動生成したものである。図 4.6(a) は本手法により生成したツル植物の基本形状を示す。表 4.1 は図 4.6(a) の基本形状を生成する際に用いたパラメータを示す。図 4.6(b) は茎の質感、子葉の枚数、葉の枚数の設定をそれぞれパターン 2、0、0 に変更し、生成した木本のツル植物の形状を示す。図 4.6(c) は子葉の枚数の設定を 2 に変更し、生成した双子葉類のツル植物の形状を示す。子葉が 2 枚となっているのがわかる。図 4.6(d) は葉の枚数の設定を 2 に変更し、生成した互生葉序のツル植物の形状を示す。図 4.6(e) は葉の質感の設定をパターン 2 に変更し、生成した基本形状の葉と違う質感のツル植物の形状を示す。図 4.6(f) は葉の大きさの設定を 25 に変更し、生成したツル植物の形状を示す。以上のように、パラメータにより様々な形状が生成できたことが確認できた。

表 4.2: 図 4.6(a) の基本形状のパラメータ

生長に関するパラメータ	設定	3次元形状モデルに関するパラメータ	設定
節間の長さ	60	茎の質感	パターン 1
茎の半径	2	葉の質感	パターン 1
巻きつく方向	左	葉の枚数	1
生長経過時間	10	子葉の枚数	1
角度	18°	葉の大きさ	12
巻きつかない節の数	1		

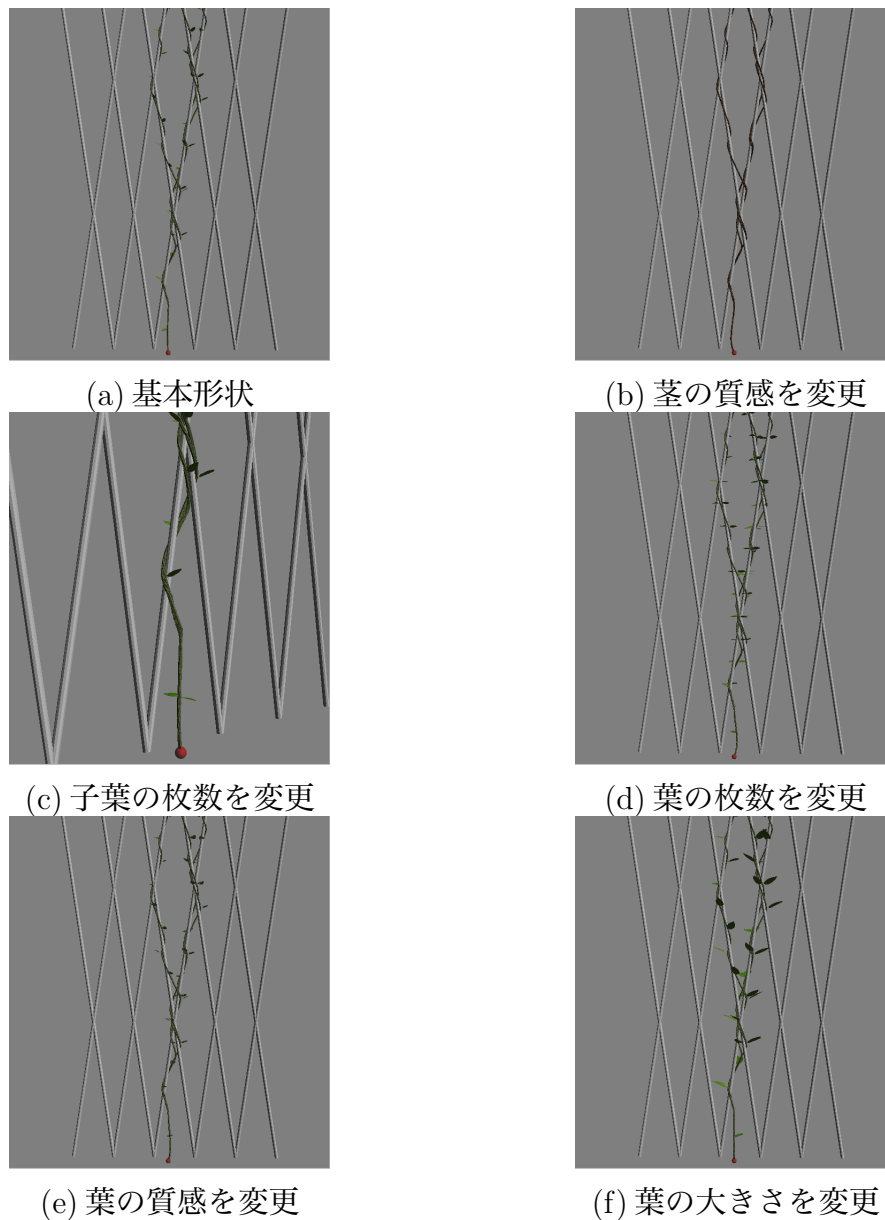


図 4.6: 3次元形状モデルの生成に影響するパラメータを変更

## 4.2 考察と課題

本研究ではツル植物の生長をシミュレートすることでより現実的な3次元形状モデルの生成を実現することが出来た。支柱によるツル植物の生成の制限を排し、支柱の表面に沿ってなだらかに巻きつくツル植物の3次元形状モデルが生成できた。

これらの点から、生長過程を考慮したツル植物の自動生成という目的を達成で



きたと言える。図 4.7 は本手法による巻きつくツル植物の 3 次元形状モデルの様子である。



図 4.7: ツル植物の巻きつき型の形状

しかし、現状の 3 次元形状モデルは以下の様な課題がある。ツル植物は風や重力、人の手などの外力によって巻きつき方が変化する可能性がある。その為、地面と平行な支柱に巻きついたり、支柱の太さによっては巻きつく力が弱く、落ちてしまうことがある。より写実的なツル植物の 3 次元形状モデルを自動生成するには以上の様な外力を考慮に入れる必要がある。

# 第 5 章

## まとめ

本研究では、既存の植物形態の生成手法には考えられていなかったツル植物の生長過程を考慮したツル植物の3次元形状モデルを生成する手法を提案した。また、ツル植物は様々な支柱に巻きつくため、どのような形状の物体を支柱と設定しても、巻きつくツル植物の形状を生成できる手法を目標とした。より現実の生長を考慮したツル植物の自動生成を、植物ごとの生長の違いをパラメータ化し、実際に生長をシミュレートすることで自動的にツル植物の3次元形状モデルを生成する手法を提案した。

本研究では、4種類あるツル植物の中でも巻きつき型を対象とした。ツル植物の回旋運動と頂芽優勢という性質を考慮した生長をシミュレートし、そのシミュレートに基づいた茎の軸により3次元形状モデルを生成した。シミュレートは実際に回旋運動や頂芽優勢を行いながら一定時間ごとに生長させ、支柱の表面とツルの接触判定を行うことで、どのような形状の支柱に巻きつくツル植物の形状を生成することができた。ツル植物の種類ごとによって異なるパラメータを考慮したシミュレートを行った。これにより、現実の生長を考慮したツル植物の茎の軸を決定することが出来た。次に、シミュレートの際に出来る茎の軸の流れが急に変化する部分を3次スプライン補間で滑らかにし、頂芽優勢の打破が起きた頂芽と子葉と巻きつかない節の部分をベジェ曲線でランダムな曲線に茎の軸を変更することにより、カクカクな茎の軸や不自然に直線的な茎の軸を修正した。最後に、3次

元形状モデルの生成に影響するパラメータを考慮した3次元形状モデルを茎の軸に沿って生成を行うことにより、ツル植物の3次元形状モデルを生成できた。これにより生長に関するパラメータや3次元形状モデルの生成に影響するパラメータを変更することで、容易に様々なツル植物の3次元形状モデルを生成することができた。

ツル植物の回旋運動と頂芽優勢といった生長過程を考慮した3次元形状モデルの生成はできたが、いくつかの課題が残っている。ツル植物は自身の生長や周囲の物体の位置関係による生長過程だけでなく、風や重力、人の手などの外力によっても形状を変える植物である。より写実的なツル植物の3次元形状モデルを生成するためにはこれらを考慮する必要がある。

# 謝辞

本研究について、渡辺大地講師並びに本研究室の皆様のご協力に感謝致します。

## 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] 千葉則茂, 大川俊一, 村岡一信, 三浦守, ”CGのための樹木の生長モデル—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.
- [3] R.Mech and P.Prusinkiewicz, ”Visual Models of Plants Interacting with Their Environment”, SIGGRAPH96, pp.397 - 410, 1996.
- [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] 英国王立園芸協会, 横井政人, 植村猶行, "低木とつる植物図鑑 1000", 日本ヴォーグ社, 1997.
- [9] 古屋由紀子, "3DCG におけるツル植物生成に関する研究", 東京工科大学学士論文, 2005.
- [10] Thomas Luft, "An Ivy Generator",  
[http://graphics.uni-konstanz.de/~luft/ivy\\_generator/](http://graphics.uni-konstanz.de/~luft/ivy_generator/).
- [11] Kun Zhou, Xin Huang, Xi Wang, Yiyong Tong, Mathieu Desbrun, Baining Guo, Heung-Yeung Shum, "Mesh Quilting For Geometric Texture Synthesis",  
In Proceedings of SIGGRAPH 2006, pp.690-697, 2006.
- [12] 櫻田守宏, "植物の世界", <http://www2u.biglobe.ne.jp/gln/14/1401.htm>.
- [13] 波田善夫, "植物生態研究室 (波田研) のホームページ",  
<http://had0.big.ous.ac.jp/hada/index.html>.
- [14] 福原達人, "植物形態学",  
<http://www.fukuoka-edu.ac.jp/fukuhara/keitai/>.
- [15] 岩瀬徹, 大野啓一, "写真で見る植物用語", 全国農村教育協会, 2004.
- [16] 長田武正, 長田喜美子, "野草図鑑 つる植物の巻", 保育社, 1984.
- [17] 和田清俊, "アサガオの生理学",  
<http://www.sc.niigata-u.ac.jp/biologyindex/wada/index2.html>.
- [18] C. ダーウィン原著, 渡辺仁訳, "よじ登り植物-その運動と習性-", 森北出版, 1991.
- [19] Fletcher Dunn, Ian Parberry 著, 松田晃一訳, "実例で学ぶゲーム 3D 数学", オライリー・ジャパン, 2008.

- [20] I.J. Shoenberg, "Contributions to the problem of approximation of equidistance data by analytic functions", *Quarterly of the Applied Mathematics*, 4:45-99, 1946.
- [21] P. Bezir, "Numerical Control: Mathematics and Applications", John Wiley & Sons, London, 1972.
- [22] 渡辺大地, "Fine Kernel Tool Kit System", <http://fktoolkit.sourceforge.jp/>.