

コンピュータグラフィックスによる
樹木画像生成に関する研究

1998年1月

博士(工学)

金山知俊

豊橋技術科学大学

論文要旨

コンピュータグラフィックスによる 樹木画像生成に関する研究

1998年1月

博士(工学)

金山 知俊

豊橋技術科学大学

近年、計算機の能力向上に伴い、従来は困難であった自然物や自然現象をCGで表現する試みが盛んに行われている。自然物の中でも樹木はもっとも身近なものの一つであり、景観シミュレーション等の分野で様々な応用が期待されるため、樹木の画像生成について様々な研究が行われている。本論文では、樹木の形状データの作成、アニメーションによる樹木の動きの表現、樹木画像の高速表示という3つのテーマに関して検討を行い、結果をまとめた。

樹木の形状データの作成方法には大きく分けて、フラクタルなどを用いて樹木風の分岐形状を作成する単純な方法と、樹木の構造や環境の影響を考慮し、樹木の生長をシミュレートする方法がある。本論文では、様々な樹種に共通の分岐規則を再現し、光、ホルモンの影響も考慮した樹木の生長モデルを構築した。この生長モデルは、光環境の影響による枝の枯死と屈曲、植物ホルモンによる頂芽優勢、休眠芽の休眠打破、枝の短枝化、屈光性、固地性などの樹木の様々な性質の再現、節、葉序などの樹木の分岐規則の正確な再現を、それぞれ、光環境モデル、ホルモンモデル、分岐モデルという三つのサブモデルを用いて実現している。これらサブモデルに与えるパラメータを変更することで、環境の変化、樹種の変更への対応を可能としている。

アニメーションによる樹木の動きの表現は、CGによる自然景観の動画像に現実感を持たせるための重要な手段とされている。あまり研究されていない。本論文では、数少ない先行研究のうち、樹木を質量を持った節点とそれらの隣接関係で近似する手法をもとに、節点数の削減、枝の伸縮による座標の発散の防止、幹や短い枝の計算省略などの改良を加えた動的なモデルを構築し、節点の動きのシミュレーションを行うことで樹木の揺れのアニメーションを実現して

論文要旨

近年、計算機の能力向上に伴い、従来は困難であった自然物や自然現象をCGで表現する試みが盛んに行われている。自然物の中でも樹木はもともと身近なものの一つであり、景観シミュレーション等の分野で様々な応用が期待されるため、樹木の画像生成について様々な研究が行われてきた。本論文では、樹木の形状データの作成、アニメーションによる樹木の揺れの表現、樹木画像の高速表示という3つのテーマに関して検討を行い、結果をまとめた。

樹木の形状データの作成方法には大きく分けて、フラクタルなどを用いて樹木風の分岐形状を作成する単純な方法と、樹木の構造や環境の影響を考慮し、樹木の生長をシミュレートする方法がある。本論文では後者の方法を採用し、様々な樹種に共通の分枝規則を再現し、光、ホルモンの影響も考慮した樹木の生長モデルを構築した。この生長モデルは、光環境の影響による枝の枯死と屈曲、植物ホルモンによる頂芽優勢、休眠芽の休眠打破、枝の短枝化、屈光性、屈地性などの樹木の様々な性質の再現、節、葉序などの樹木の分枝規則の正確な再現を、それぞれ、光環境モデル、ホルモンモデル、分枝モデルという三つのサブモデルを用いて実現している。これらサブモデルに与えるパラメータを変更することで、環境の変化、樹種の変更への対応を可能としている。

アニメーションによる樹木の揺れの表現は、CGによる自然景観の動画像に現実感を持たせるための重要な手段となりうるが、従来、あまり研究されていない。本論文では、数少ない先行研究のうち、樹木を質量を持った節点とそれらの隣接関係で近似する手法をもとに、節点数の制限、枝の伸縮による座標の発散の防止、幹や短い枝の計算省略などの改良を施すことで、より高速で汎用的なモデルを構築し、節点の動きのシミュレーションを行うことで樹木の揺れのアニメーションを実現して

いる。

樹木画像の高速表示は、樹木の形状データを保持しつつ、細い枝は線分、太い枝はテクスチャマッピングされた1枚のポリゴンで表現することでデータ量削減、任意の樹形への対応が可能な樹木画像の高速表示手法を実現した。本手法は樹木全体の画像をポリゴンにテクスチャマッピングする手法とは異なり、樹木の形状データを保持しているので、上記の樹木の揺れの表現手法と組み合わせることで樹木の変形を表現することも可能である。

Studies on Botanical Tree Image Generation by Computer Graphics

In recent years, representation of natural objects and/or natural phenomena by CG, which was previously a difficult task, has been intensively studied by the improvement of computer power. A botanical tree is one of the most familiar natural object. Recently, a number of studies have been done on botanical tree image generation, that is expected to be applied to various fields e.g., landscape simulation. In this dissertation, we focus on topics of generation of botanical tree shape data, representation of botanical tree swaying, and high speed botanical tree image generation.

Conventional botanical tree shape data generation methods are classified into two kinds of methods, simple methods which makes branching shapes look like trees by using fractal, and methods of tree growth simulation which can represent tree structure and reflect influence of environment. In this dissertation, we adopt the latter kind of methods, and we construct the growth model of botanical trees which can simulate the branching rule common to various trees, light-environment, and plant hormone.

This model consists of three sub-models, i.e., the light-environment model, the hormone model and the branching model. The light-environment model can simulate death and bend of a branch by the influence of light-environment, the hormone model can simulate the various phenomena such as apical dominance, dormancy break, change into a dwarf shoot, phototropism and geotropism by plant hormone, and the branching model can simulate accurate modeling of the branching rule of trees such as nodes and phyllotaxis. The growth model can generate many kinds of trees and support environmental

change by adjusting parameters to give for each sub-models.

The representation of botanical tree swaying is important in the sense that it gives a reality to the natural landscape animation, but this topic has been seldom studied. In this study, we develop the animated method of tree swaying. This method is based on

Abstract

where a tree is modeled by node-points having mass and by their neighboring relation, and the method proposed in this dissertation improves the limitation in the node number, prediction of directions of coordinates of one node-point, omission of motion calculation in each node-point. This method would become faster and more accurate than the conventional methods, and it realizes the animation of botanical tree swaying.

Studies on Botanical Tree Image Generation by Computer Graphics

In recent years, representation of natural objects and/or natural phenomena by CG, which was previously a difficult task, has been intensively studied by the improvement of computer power. A botanical tree is one of the most familiar natural object. Recently, a number of studies have been done on botanical tree image generation, that is expected to be applied to various fields e.g., landscape simulation. In this dissertation, we focus on topics of generation of botanical tree shape data, representation of botanical tree swaying, and high speed botanical tree image generagion.

Conventional botanical tree shape data generation methods are classified into two kinds of methods, simple methods which makes branching shapes look like trees by using fractal, and methods of tree growth simulation which can represent tree structure and reflect influence of environment. In this dissertation, we adopt the latter kind of methods, and we construct the growth model of botanical trees which can simulate the branching rule common to varuious trees, light-environment, and plant hormone.

This model consists of three sub-models; i.e., the light-environment model, the hormone model and the branching model. The light-environment model can simulate death and bend of a branch by the influence of light-environment, the hormone model can simulate the various phenomena such as apical dominance, dormancy break, change into a dwarf shoot, phototropism and geotropism by plant hormone, and the branching model can simulate accurate modeling of the branching rule of trees such as nodes and phylotaxis. The growth model can generate many kinds of trees and support environmental

change by adjusting parameters to give for each sub-models.

The representation of botanical tree swaying is important in the sense that it gives a reality to the natural landscape animation, but this topic has been seldom studied. In this study, we develop the animation method of tree swaying. This method is based on past studies where a tree is modeled by node-points having mass and by their neighboring relation, and the method proposed in this dissertation improves the limitation in the node number, prevention of divergence of coordinates of the node-point, omission of motion calculation for trunk and short branches. By means of these improvements, this method would become faster and more useable than conventional methods, and it realizes the animation of botanical tree swaying.

We also develop the high speed botanical tree image generation method. This method uses textures for trunks and leaves, uses lines for twigs, and enables to reduce data quantity, to cope with any shapes of trees, and to represent varying trees, which cannot be simultaneously attained by conventional methods. This method also makes possible to represent tree deformation combined with the botanical tree swaying method.

樹木の揺れのアニメーション,

電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J80-D-II, No. 7, pp. 1843-1851

(1997年7月)

(3章に対応)

3. 後山知徳, 増山繁:

テクスチャマッピングと線分描画による3次元樹木画像の高速生成手法,

電子情報通信学会論文誌 (D-II) 掲載決定 (レター).

(4章に対応)

B. 学会研究会講演

1. 金山知俊, 阪田省二郎, 増山繁:

さまざまな樹種に対応可能な樹木の生長モデル,

発表論文リスト

(岡山理科大学, 1994年12月)

電子情報通信学会 (パターンの認識と理解研究会) と共催

A. 学術論文

1. 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-II), Vol. J79-D-II, No. 8, pp. 1362-1373

(1996年8月).

(2章に対応)

2. 金山知俊, 増山繁:

樹木の揺れのアニメーション,

電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J80-D-II, No. 7, pp. 1843-1851

(1997年7月).

(3章に対応)

3. 金山知俊, 増山繁:

テクスチャマッピングと線分描画による 3次元樹木画像の高速生成手法,

電子情報通信学会論文誌 (D-II) 掲載決定 (レター).

(4章に対応)

B. 学会研究会講演

1. 金山知俊, 阪田省二郎, 増山 繁 :
さまざまな樹種に対応可能な樹木の生長モデル, 樹木の生長モデル,
情報処理学会グラフィックスとCAD研究会
(岡山理科大 1994 年 12 月).
※ 電子情報通信学会 (パターン認識・理解研究会) と共催
2. 金山知俊, 増山 繁 :
樹木の揺れのアニメーション,
情報処理学会 第 52 回 (平成 8 年前期) 全国大会
(電通大 1996 年 3 月).
3. 金山知俊, 増山 繁 :
樹木の揺れのアニメーション,
3 次元画像コンファレンス'96
(工学院大 1996 年 7 月).
4. 金山知俊, 増山 繁 :
テクスチャマッピングと線分描画による 3 次元樹木画像の高速生成法,
平成 9 年度 電気関係学会東海支部連合大会
(愛工大 1997 年 9 月).

C. 解説等

1. 金山知俊：

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，

画像ラボ，Vol.8 No.3, pp.20-22 (1997年5月)

(論文の解説).

1. 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 樹木画像生成に関する従来の研究	2
1.3 研究目的	3
1.4 本研究の特徴	5
1.5 本論文の構成と内容	5
2. 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	7
2.1 はじめに	7
2.2 樹形の形成に関係する要因	8
2.3 生長モデル	9
2.3.1 分枝モデル - 遺伝的変因の再現 -	10
2.3.2 光強度モデル - 外因性変因の再現 -	11
2.3.3 ホルモンモデル - 内因性変因の再現 -	11
2.4 樹木の生長制御	14
2.4.1 枝の枯死の制御	15
2.4.2 ホルモン量の計算	15
2.4.3 枝の生長と地曲の制御	17
2.4.4 枝の太さの制御	20
2.4.5 翌年の発芽数の制御	22
2.4.6 休眠打破の制御	23
2.5 シミュレーション	24

目次

2.5.1	様々な分枝パターンの再現	23
2.5.2	ホルモンによる樹木の性質の再現	24
2.5.3	環境、ホルモンの影響	27
2.5.4	様々な樹種の生成	28
2.5.5	樹木の生長	33
2.5.6	同じ樹種、同じ条件での様々な樹形	34
2.6	まとめ	34
1	序論	1
1.1	研究の背景	1
1.2	樹木画像生成に関する従来の研究	2
1.3	研究目的	3
1.4	本研究の特徴	5
1.5	本論文の構成と内容	5
2	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	7
2.1	はじめに	7
2.2	樹形の形成に関係する要因	8
2.3	生長モデル	9
2.3.1	分枝モデル – 遺伝的要因の再現 –	10
2.3.2	光環境モデル – 外因性要因の再現 –	11
2.3.3	ホルモンモデル – 内因性要因の再現 –	11
2.4	樹木の生長制御	14
2.4.1	枝の枯死の制御	15
2.4.2	ホルモン量の計算	15
2.4.3	枝の生長と屈曲の制御	17
2.4.4	枝の太さの制御	20
2.4.5	翌年の発芽数の制御	22
2.4.6	休眠打破の制御	23
2.5	シミュレーション	23

2.5.1	様々な分枝パターンの表現	23
2.5.2	ホルモンによる樹木の性質の再現	24
2.5.3	環境, ホルモンの影響	27
2.5.4	様々な樹種の生成	28
2.5.5	樹木の生長	33
2.5.6	同じ樹種, 同じ条件での様々な樹形	34
2.6	まとめ	34
3	樹木の揺れのアニメーション	35
3.1	はじめに	35
3.2	樹木の運動のモデル化の方針	36
3.3	樹木の運動モデル	38
3.3.1	樹木データと節点の設定	38
3.3.2	樹木の変形と節点の運動の計算	40
3.3.3	節点間の補間	47
3.4	枝の揺れの運動計算の省略	49
3.4.1	揺れの計算を行わない枝を決定	49
3.4.2	動かない節点と親枝に追従する節点の決定	51
3.4.3	親の節点に追従する節点の計算方法	51
3.5	アニメーション	52
3.5.1	1本の枝のみの例	52
3.5.2	枝の広がった樹形を対象とした例	52
3.5.3	強風の例	55
3.5.4	葉がある場合の例	55
3.5.5	枝が上に伸びた樹形を対象とした例	55
3.6	まとめ	56
4	テクスチャマッピングと線分描画による3次元樹木画像の高速生成手法	57
4.1	はじめに	57
4.2	樹木画像の生成手法	58

4.2.1	描画方法の選択	58
4.2.2	テクスチャ生成	59
4.2.3	テクスチャマッピングによる枝, 葉の描画	59
4.2.4	線分の描画	60
4.3	結果	61
4.4	まとめ	63
5	結 論	67
5.1	まとめ	67
5.2	今後の課題	68
2.1	樹木の性質	15
2.2	枝の長さの制御	19
2.3	照光率, 照地性の制御	20
2.4	枝の生長と屈曲	21
2.5	発芽確率の制御	22
2.6	樹齡による発芽確率の変化	22
2.7	様々な分枝パターン	24
2.8	頂芽優勢 (短枝の頂生側芽最大発芽確率の変更)	25
2.9	頂芽優勢 (頂生側生枝のホルモン濃度率の変更)	25
2.10	頂芽優勢&枝の短枝化	26
2.11	休眠打破 (剪定)	26
2.12	休眠打破 (剪定)	27
2.13	照光性	27
2.14	照光性と照地性	28
2.15	幹の再生	29
2.16	本研究モデルによる樹木の生成例	30
2.17	樹高の生長	32
2.18	生長と計算時間との関係	32
2.19	サグラの生長	33

目 次

2.1	枝と枝のモデル	11
2.2	様々な葉序	12
2.3	分枝の種類	12
2.4	樹木の性質	15
2.5	枝の長さの制御	19
2.6	屈光率, 屈地率の制御	20
2.7	枝の生長と屈曲	21
2.8	発芽確率の制御	22
2.9	樹齢による発芽確率の変化	22
2.10	様々な分枝パターン	24
2.11	頂芽優勢 (短枝の頂生側芽最大発芽確率の変更)	25
2.12	頂芽優勢 (頂生側生枝のホルモン継承率の変更)	25
2.13	頂芽優勢&枝の短枝化	26
2.14	休眠打破	26
2.15	休眠打破 (剪定)	27
2.16	屈光性	27
2.17	屈光性と屈地性	28
2.18	幹の再生	29
2.19	本研究モデルによる樹木の生成例	30
2.20	樹高の生長	32
2.21	生長と計算時間との関係	32
2.22	サクラの生長	33

2.23	同じ環境でのケヤキの様々な樹形	34
3.1	樹木の節点モデルによる表現	37
3.2	樹木データの構造	39
3.3	節点の設定	40
3.4	方向のずれによる復元力	42
3.5	樹形の崩壊	42
3.6	親枝に働く復元力の反作用による力	44
3.7	相対方向の計算	45
3.8	基準方向の計算	45
3.9	節点に働く移動力	47
3.10	距離のずれの修正	48
3.11	節点間の補間	48
3.12	親の節点に追従する節点の座標計算	51
3.13	例 1 1本の枝	52
3.14	例 2 枝の広がった樹形	54
3.15	例 3 枝の広がった樹形 (強風)	54
3.16	例 4 枝の広がった樹形 (葉のある場合)	54
3.17	例 5 枝が上に伸びた樹形	55
4.1	テクスチャ生成	60
4.2	テクスチャマッピングによる枝の描画	61
4.3	線分描画による枝の色計算	62
4.4	ポリゴン表示による樹木画像	65
4.5	本手法による樹木画像	66
5.1	葉のテクスチャ生成	70

表目次

序 論

2.1 シミュレーションで用いる主なパラメータ	16
2.2 樹種ごとのパラメータ	31
2.3 計算時間と各処理の割合	33
1.1 研究の背景	
3.1 パラメータとデータ	53
4.1 本手法の効果	63
4.2 画像生成時間と処理の割合	64

したものはもちろん計算機の能力向上が大きな要因であるが、その利用技術の発達も大きく貢献している。特に、気象予報などの、自然物や自然現象の理解にはその適切なモデル化とシミュレーションが不可欠である。

また、計算機の能力向上に伴い、従来は困難であった自然の物体や自然現象をコンピュータグラフィクス(以下、CG)で表現する試みが盛んに行われている。現在CGによる映像は産業デザイン、科学・技術計算結果の可視化などの分野だけでなく、映画、コマーシャルやコンピュータゲームなどのエンターテインメント分野にも用いられ、日常的に目にすることが多くなっている。CGで自然の物体や自然現象の可視化を実現することで、より自然で現実感のある映像を作成することが可能になる。

自然の物体や自然現象のうち、岩石、山脈、氷河、雲などの無生物は物理法則による記述やフラクタルの利用で表現できるものが多く、生物でも動物は種によって形状、色彩がほぼ一意に定まるので、データ作成さえできればそれをCGに利用することはそれほど困難ではない。しかし、植物、特に樹木は種類によって形が一意に定まることはなく、形状も複雑であるので現実の樹木からデータを奪取することも容

第 1 章

序 論

1.1 研究の背景

計算機の発達は我々の生活に大きな変化をもたらした。給与計算などの事務的な処理から、工業製品の設計、気象予測などの複雑な分野まで、計算機を利用することによってより正確に、あるいはより容易になった事物は数多い。これらをもたらしたものはもちろん計算機の能力向上が大きな要因であるが、その利用技術の発達も大きく貢献している。特に、気象予測などの、自然物や自然現象の理解にはその適切なモデル化とシミュレーションが不可欠である。

また、計算機の能力向上に伴い、従来は困難であった自然の物体や自然現象をコンピュータグラフィックス (以下、CG) で表現する試みが盛んに行われている。現在 CG による映像は産業デザイン、科学・技術計算結果の可視化などの分野だけでなく、映画、コマーシャルやコンピュータゲームなどのエンターテイメント分野にも用いられ、日常的に目にすることが多くなっている。CG で自然の物体や自然現象の可視化を実現することで、より自然で現実感のある映像を作成することが可能になる。

自然の物体や自然現象のうち、岩石、山脈、水流、雲などの無生物は物理法則による記述やフラクタルの利用で表現できるものが多く、生物でも動物は種によって形状、色彩がほぼ一意に定まるので、データ作成さえできればそれを CG に利用することはそれほど困難ではない。しかし、植物、特に樹木は種類によって形が一意に定まることはなく、形状も複雑であるので現実の樹木からデータを得ることも容

易ではない。また、CGによる樹木の表現には建築設計のビジュアルシミュレーション、公園、庭園の景観シミュレーション、植木の生長予測、木製品のデザイン開発など、様々な応用が期待でき、研究として非常に重要なテーマである。

1.2 樹木画像生成に関する従来の研究

樹木画像生成に関する研究は、以前から多くの研究者によってなされており、その手法も様々である。最も多いのはやはり樹木の形状データを作成する研究である。樹木の形状データを作成する手法としては、以下のようなものが提案されている。

- フラクタル [19]. 樹木の分枝や葉脈のパターン、シダ類にみられる自己相似性に着目し、フラクタル図形でそれらを表現する手法であるが、これによって得られる形状は規則的で、現実的な樹木の表現はできない。
- 形式文法の生成規則 [2, 22]. 生成規則によって分岐パターンを定義できることを利用して樹木形状データを作成する手法である。これもフラクタル同様、得られる形状は規則的で現実感は得られない。
- 実際の樹木を観察してデータを作成し、樹形を作成 [23, 28]. この手法は現実の樹木から統計データを得て、これにもとづいて樹形を作成するため、前述の2つの方法と比較するとより現実的な樹形が得られるが、十分なデータをあらかじめ用意する必要があり、また環境の変化の表現、樹木の生長過程の表現はできない。
- 環境の影響を考慮した手法 [7, 1, 13, 18]. 光、重力などの周囲の環境の影響によって枝の生長、屈曲を変化させる手法で、これによって、より現実の樹木に近い樹形データが得られるようになった。また、樹木の生長過程の表現も可能である。
- 植物ホルモンの導入 [3, 4]. 植物ホルモンによって樹木の様々な性質を再現する手法で、これによって、さらに現実に近い樹形データが得られる。また、剪定と、その後の枝の再生の表現も実現できる。

このように、樹木の形状データを作成する手法は数多くあり、現実の樹木の形状を忠実に再現することを目指して進化してきた。ただ、現実的な樹形を生成できる手法はより多くのコストを必要とするため、目的に応じた手法を選択して用いる必要がある。

作成した樹木の形状データを確認するには、それを表示する必要がある。樹木は一般に人工の物体と比較して複雑なため、通常のポリゴン表示では高速な描画は困難である。そこで樹木を高速に表示する手法がいくつか提案されている。

- テクスチャマッピング [15]. あらかじめ樹木の画像を用意しておき、単純な形状のポリゴンにマッピングする手法である。この手法では樹木の形状データを計算機で作成せず、現実の樹木の画像を使用することもできる。ただ、この手法では、視点変更を行なった場合に表示が不自然になることがあり、樹木の変形にも対応できない。
- フラクタルの利用 [16]. 樹木の自己相似性に着目し、フラクタルで作成した樹木に対して指定した解像度以下の細かい枝葉を樹木全体の縮小写像で近似する手法である。この手法にはフラクタルで作成した樹木にしか適用できないという問題がある。
- 枝、葉の描画方法を変更 [8]. 視点からの距離に応じて枝、葉を線分や点描で表示、あるいは表示を省略する手法である。この手法は遠景で樹木が小さく表示される場合には有効である。

その他、樹木画像生成に関する研究としては、風による樹木の揺れの表現 [24, 14], 樹皮、木目のテクスチャ作成 [17], 葉、花、果実の表現 [26, 9], 紅葉の表現 [25] などがある。

1.3 研究目的

前述のように、樹木画像生成には様々な研究が考えられるが、従来の研究の中には問題点が残されているものもあり、また、十分に研究が行われていないテーマも多い。本研究では様々な応用の期待される、1~数本の樹木の静止画及び動画のCG

作成を目的として、それを実現するために必要な以下の3項目について個別に検討を行った。

- 樹木の形状データの生成
- 樹木の揺れの表現
- 樹木画像の高速表示

これらの研究が必要な理由、及び、これらを研究対象とした理由は、以下の通りである。

1. 樹木の形状データの生成

樹木画像生成の研究のうち、樹木の形状データの生成は最も重要な部分である。現実感のある樹木形状データが得られなければ、最終的に現実感のある樹木画像は得られない。また、単なる形状データ作成ではなく、樹木の生長をシミュレートすることで樹木の将来の姿を予想することも可能になる。

2. 樹木の揺れの表現

樹木の画像生成の研究では形状データやテクスチャの作成に関する研究は盛んに行われているが、動画の生成を目的とした樹木の揺れの表現に関する研究はあまり行われていない。映画などへの応用を考えると、樹木の揺れの表現の研究は非常に重要である。

3. 樹木画像の高速表示

前述したように、現実感のある樹木形状データはかなり複雑になる。そのような樹木の動画を実時間で表示するには現状では高速な計算機を用意しなければならない。低速な計算機でも樹木の動画を実時間表示できるような手法を考案することは意義がある。また、高速な計算機でも並木や林などの樹群の表示に応用することでより高速で精緻な画像表示が実現できる。

これらの各項目はそれぞれ独立した問題であるが、これらを組み合わせることで1本の樹木の生長、運動のシミュレーションと、その様子の高速表示による確認が実現でき、単体の樹木の画像生成に関しては必要な手法がほぼ揃うことになる。

1.4 本研究の特徴

本研究は全体として樹木画像生成の研究と捉えることができるが、個々の研究内容はそれぞれ独立している。それぞれの研究の特徴を以下に示す。

1. 樹木の形状データの生成

本研究では、まず多くの樹種に共通の樹木の基本的な構造に着目し、それに光、植物ホルモンが樹木に及ぼす影響を取り入れることで現実に存在する樹木を、その形状だけでなく生長の過程も再現することを可能にした。また、パラメータを調整することで、単一のモデルで様々な樹種の形状の再現も実現している。

2. 樹木の揺れの表現

本研究では、風による樹木の揺れを高速に計算し、実時間で表示することを目的とし、質量を持った節点 (node-point) とそれらの隣接関係で樹木を表し、風から受ける力による節点位置のずれを補正する方向に復元力を与えることで全体として樹木形状を崩さずにそれぞれの枝が動く手法 [14] をもとに、節点の数の制限、枝の伸縮による座標の発散の防止、幹や短い枝の計算省略などの改良を施すことで、より高速で汎用的なモデルを実現した。

3. 樹木画像の高速表示

本研究では、複雑な樹木形状データを高速にレンダリングすることを目的とし、樹木の形状データを保持しつつ、細い枝は線分、太い枝はテクスチャマッピングされた1枚のポリゴンで表現することでデータ量削減、任意の樹形への対応が可能な樹木画像の高速表示手法を実現した。本手法は樹木全体の画像をポリゴンにテクスチャマッピングする手法とは異なり、樹木の形状データを保持しているので、上記の樹木の揺れの手法と組み合わせることで樹木の変形を表現することも可能である。

1.5 本論文の構成と内容

本章に続いて第2章では、樹木の形状データを作成する生長モデルについて述べる。この生長モデルは、光環境の影響による枝の枯死と屈曲、植物ホルモンによる

頂芽優勢，休眠芽の休眠打破，枝の短枝化，屈光性，屈地性などの樹木の様々な性質の再現，節，葉序などの樹木の分枝規則の正確な再現を，それぞれ光環境モデル，ホルモンモデル，分枝モデルという三つのサブモデルを用いて実現している．これらサブモデルに与えるパラメータを変更することで，環境の変化，樹種の変更への対応を可能としている．

まず，樹形の形成に関係する要因について説明する．次に，それらの要因を考慮した生長モデルを提案し，このモデルを用いてリアルな樹形が表現可能であることを示す．さらに，現実の樹種を想定した樹木の生成例を示す．

第3章では，樹木の揺れの表現方法について述べる．自然物のCGシミュレーションを行う場合，形状のみならず，動きの再現も重要であるが，風などの外力による樹木の揺れの表現については従来あまり行われていない．本研究では，樹木を質量を持った節点とそれらの隣接関係で近似する手法 [14] を改良し，節点の動きのシミュレーションを行うことで樹木の揺れのアニメーションを実現している．

まず本研究での樹木の運動モデルおよび，枝の運動計算の省略方法について説明し，そのモデルを用いて樹木の揺れを表現可能であることを示す．

第4章では，樹木画像の高速生成手法について述べる．樹木のような複雑な構造物を表現するにはデータ量が非常に多いため，レンダリングを行う場合には1本の樹木を表現する場合でも数万から数十万ポリゴンを必要とすることもある．そのため，複数の樹木が存在する景観の画像を実時間で生成することは困難である．本研究では，幹や葉をテクスチャ，細い枝を線分で表現し，従来同時には達成不可能であった，データ量の削減，任意の樹形への対応，樹木の変形の表現がすべて可能な3次元樹木画像の高速生成手法を示す．

以上の各章の手法は独立したものであり，個別に適用することができる．第5章では，第4章までに検討してきた結果を総合的にまとめ，今後の課題について述べる．

第 2 章

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

2.1 はじめに

ハードウェアの性能向上とソフトウェアの進歩によって，コンピュータグラフィックス (CG) の表現力は年々向上している．以前は困難であった自然物や自然現象の CG による表現も，近年では一見して現実と変わらないほどリアルな表現が可能となりつつある．

自然物の中でも樹木は最も身近なものの一つであり，建築設計のビジュアルシミュレーション，公園，庭園の景観シミュレーション，植木の生長予測など，様々な応用が期待されるため，樹木の CG 画像生成については多くの方法が試みられてきた．中でも，生長モデルを用いて樹木の 3 次元データを作成する方法は，平面に樹木のテクスチャを貼る方法等と比べると，より多くの計算時間やメモリーを必要とするが，自由な視点で観察できることや，画像データを蓄積しておく必要がないという利点があり，1 本～数本の樹木画像生成には最適な方法である．

樹木の生長モデルは今までも様々な研究者によって提案されており，これらは，環境を考慮していないモデル [2, 19, 22, 23, 28] と，環境を考慮したモデル [7, 3, 1, 13, 4, 18] とに大別される．環境を考慮していないモデルでは，あらかじめ定められたパラメータや乱数などによって樹木を生成する．そのため，周囲の環境に対応して変化した樹形は得られない．

一方，環境を考慮したモデルとしては，光，重力等によって樹形が変化する生長モ

デルがいくつか提案されている [7, 1, 13, 18]. これらの生長モデルでは, 周囲の環境の影響を受けて枝の枯死や屈曲が起こるため, 環境を考慮しないモデルと比べてより自然な樹形を生成できる. さらに最近では, 架空の植物ホルモンを導入して, さまざまな樹木の性質を表現できる生長モデルも提案されている [3, 4]. しかし, 環境を考慮した従来の生長モデルは, 逆に節, 葉序などの, 環境と関係無い要因により決定され, 樹種毎に異なる樹木の構造を正確に再現していないものが多く [7, 3, 1, 13, 4], 一方, 樹木の構造を再現したモデルでも単一の樹種にしか対応していない [18]. 自然景観のシミュレーション等への応用を考えると, 現実に存在する様々な種類の樹木のリアルなデータを生成可能な生長モデルが必要であろう.

そこで本章では, 様々な樹種に共通の樹木の分枝規則を再現し, 光やホルモンが樹木の生長に及ぼす影響も考慮した樹木の生長モデルを導入する. この生長モデルは, 光環境の影響による枝の枯死と屈曲, 植物ホルモンによる樹木の様々な性質の再現, 樹木の分枝規則の正確な再現を, それぞれ光環境モデル, ホルモンモデル, 分枝モデルという三つのサブモデルを用いて実現している. これらサブモデルに与えるパラメータを変更することで, 環境の変化, 樹種の変更への対応を可能としている.

以下, 2.2節ではまず, 樹形の形成に関係する要因について説明する. 次に, 2.3節ではそれらの要因を考慮した生長モデルを提案し, 2.4節では樹木の生長制御の方法について説明する. 2.5節ではこの生長モデルを用いてリアルな樹形が表現可能であることを示し, また現実の樹種を想定した樹木の生成例を示す. 最後に, 2.6節で本章のまとめを行う.

2.2 樹形の形成に関係する要因

樹木の生長による樹形の形成には様々な要因が関係しているが, それらは遺伝的要因, 光, 重力等による外因性要因, 栄養, ホルモン等による内因性要因の三つに大別される.

樹木も生物である以上, その姿形は遺伝子によって厳密に規定されている. 例えば, 葉や花の形, 色等は遺伝子で決定され, 桜の木にバラの花が咲くようなことは決してない. 現実の植物の生長をシミュレートするためには, この遺伝的要因を生

長モデルに取り入れる必要がある。本研究では、樹木の遺伝的要因を考慮するために、生長モデルの中にサブモデルとして樹木の構造、分枝を管理する分枝モデルを取り入れた。

ただ、樹木は草木とはちがいで、数十年、場合によっては数百、数千年の寿命を持つため、環境によってその生長は大きく影響を受ける。従って、遺伝的要因だけでは環境による樹形の変化を表現することは不可能である。次の外因性要因も考慮すれば、よりリアルな樹形を生成することが可能になる。

樹木は周囲の環境によってその生長に様々な影響を受ける。環境としては光、重力、風、温度、水、地質等、非常に多くの要因が考えられる。これらの外因性要因のうち、特に光や重力による枝の屈曲は樹形に大きな影響を与えるため、従来の研究でも数多く考慮されている [7, 1, 13, 18]。本研究では、外因性要因のうち特に重要な光を考慮する光環境モデルをサブモデルとして生長モデルに取り入れた。

遺伝的要因と外因性要因を考慮することで、比較的リアルな樹形を生成することができる。次の内因性要因も考慮することで、より現実の樹木に近い生長シミュレーションが可能となる。

樹木は葉での光合成によって有機養分を生成し、根からは水分と無機養分を吸収して体の各部に輸送することで生命を維持している。また、樹木は植物ホルモンを生産して芽の発芽や枝の伸長、花の形成等を制御している。生物としての樹木の生長をシミュレートするには、これらの内因性要因を考慮しなければならない。また、頂芽優勢や枝折れ、剪定などによる休眠芽の休眠打破など、樹木の様々な性質を表現するのにも、この方法は有効である。本研究では、内因性要因のうち、樹木の生長を制御する植物ホルモンに着目し、サブモデルの一つとしてホルモンモデルを生長モデルに取り入れた。

2.3 生長モデル

上記の通り、本研究の生長モデルは、遺伝的要因を再現する分枝モデル、外因性要因を再現する光環境モデル、内因性要因を再現するホルモンモデル、の三つのサブモデルから構成されており、光環境モデルからホルモンモデル、分枝モデルへ、ホルモンモデルから分枝モデルへとそれぞれ影響を及ぼすことで樹木の生長制御を

行っている。

以下、各サブモデルの概要について説明する。

2.3.1 分枝モデル – 遺伝的要因の再現 –

樹木はその種類によって様々な異なった枝振りを持っているが、その生長、分枝には樹種の違いによらない以下のような共通の特徴が存在する [6, 29].

- a. 枝には葉や芽 (bud) ができる節 (node) がある (節と節の間は節間 (internode) という) (図 2.1(a))
- b. 葉の配列には規則性 (葉序 (phyllotaxis)) がある (一つの節につく葉の数が 1 枚なら互生 (alternate), 枝を挟んで 2 枚なら対生 (decussate), 枝を取り巻くように 2 枚以上の時は輪生 (verticillate) といい、互生には葉の配列の角度によって $1/2, 1/3, 2/5, 3/8 \dots$ など多くの種類がある) (図 2.2)
- c. 新しい葉は新しく生えた枝 (新生枝) にのみ付き、古い枝から葉だけが生えることはない
- d. 芽は枝の先端あるいは葉の腋にできる (枝の先端にできる芽を頂芽 (terminal bud), 葉の腋にできる芽を側芽 (lateral bud) という. 頂芽のすぐ横にできる側芽を頂生側芽 (terminally lateral bud) といって他の側芽と区別することもある) (図 2.1(a))
- f. 枝には長く伸びた長枝 (long shoot) と、ほんの僅かしか伸びなかった短枝 (dwarf shoot) がある (頂生枝は長枝, 側生枝は短枝になりやすい (頂芽優勢))
- g. 分枝の仕方には頂芽が伸びて真っすぐな主軸を作る単軸分枝 (monopodial branching) と、頂芽ができず、側枝がジグザグに伸びながら枝分かれする仮軸分枝 (sympodial branching) の 2 種類がある (図 2.3)

これらはあらゆる種類の樹木に共通の特徴である。これらの特徴を考慮し、モデル化したものが本研究における分枝モデルである (図 2.1(b))。本研究の分枝モデルでは 1 年間に伸びた枝を一つの枝として管理し、その節数、節間長や葉序、芽の数や芽のつく位置、枝の分枝角などをパラメータとして設定でき、これらの数値を変

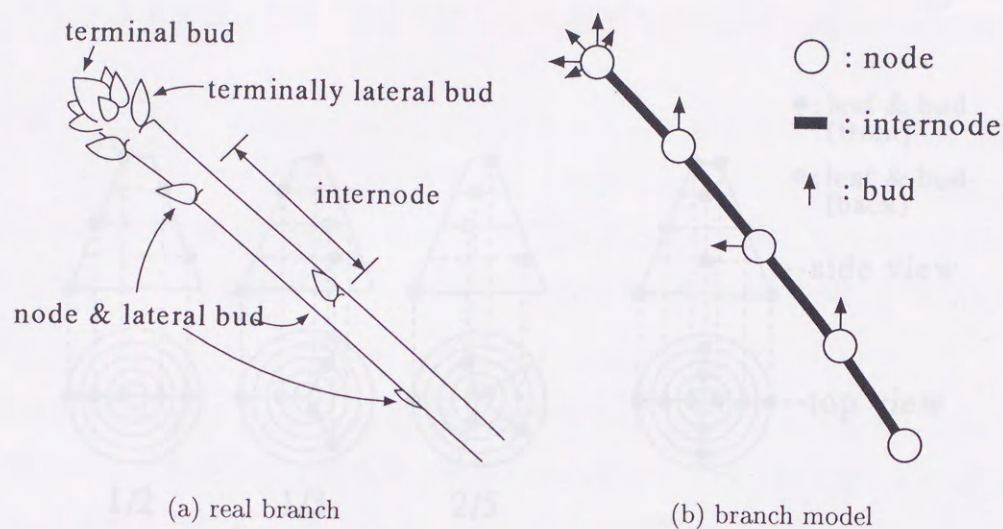


図 2.1: 枝と枝のモデル

更することによって樹種による違いを表現することができる (表 2.1). また, 節数や節間長など, 一部のパラメータをホルモンモデルの影響によって変化させることで, 樹木の生長を制御することができる.

2.3.2 光環境モデル – 外因性要因の再現 –

樹木の生長モデルにおいて光環境を考慮することは重要である. 光環境を考慮することによって受光量不足による枝の枯死や枝がより光の強い方向に向かって伸びる, 屈光性が再現でき, より自然に近い表現が得られる.

光環境モデルとしては, 千葉らが提案した, 葉を葉球という遮光球で近似する方法 [13] を用いた. 但し, 光環境モデルでは枝の枯死と受光量の計算のみを行ない, 枝の屈光性は次に示すホルモンモデルと組み合わせて実現している.

2.3.3 ホルモンモデル – 内因性要因の再現 –

樹木には頂芽優勢, 芽の休眠と休眠芽の休眠打破, 枝の短枝化等の性質がある (図 2.4). これらの樹木の性質は樹木内部で作られる植物ホルモンという物質によって制御されている [27]. 植物ホルモンの作用を適切にモデル化することができれば, 樹

木の性質を表現することが可能となり、より現実の樹木に近い樹形の生成が期待できる。

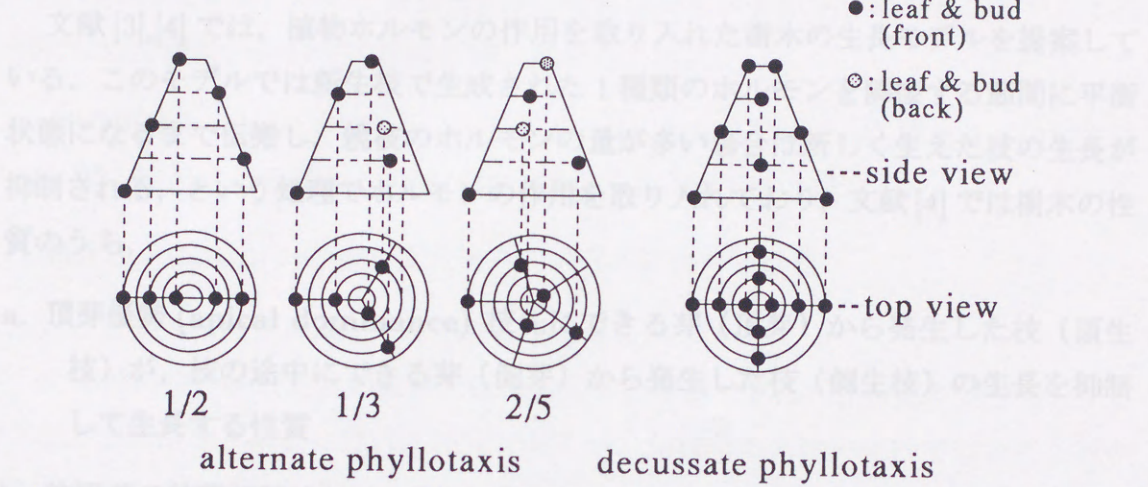


図 2.2: 様々な葉序

e. 枝の幹化 (change in leadership) 枝が折れたり切られたりした時に幹の代わりとなる枝が現れる性質

さらに文献[3]では

d. 屈曲性 (geotropism) 重力と反対の方向 (上向き) に曲がる性質を実現している。

しかし、このモデルはホルモンの作用が平衡状態になったとき、繰り返し計算を必要とするため、計算に時間がかかる。また、光環境の変化に応じてホルモンの生長量を変化させることもできない。そこで、本研究では以下のようになり、繰り返し計算を必要とせず、光環境の変化を考慮したホルモンのモデル化を行うこととした。

1. ホルモンは、根際のみ
2. ホルモンは新生枝でのみ生成
3. ホルモンの生長抑制効果は、葉の生長を抑制する

(a) monopodial branching (b) sympodial branching

4. ホルモンは枝先から幹、枝の分岐点から幹へ

5. 新生枝は親枝の周年のホルモン濃度を継承

図 2.3: 分枝の種類

木の性質を表現することが可能となり、より現実の樹木に近い樹形の生成が期待できる。

文献 [3],[4] では、植物ホルモンの作用を取り入れた樹木の生長モデルを提案している。このモデルでは新生枝で生成された 1 種類のホルモンを隣接する節間に平衡状態になるまで伝搬し、親枝のホルモンの量が多い場合は新しく生えた枝の生長が抑制される、という処理でホルモンの作用を取り入れており、文献 [4] では樹木の性質のうち、

- a. 頂芽優勢 (apical dominance) 枝先にできる芽 (頂芽) から発生した枝 (頂生枝) が、枝の途中にできる芽 (側芽) から発生した枝 (側生枝) の生長を抑制して生長する性質
- b. 休眠芽の休眠打破 (dormancy break) 上方の枝が折れたり切られたりした時に、切口付近の休眠芽が発芽する性質
- c. 枝の幹化 (change in leadership) 幹が折れたり切られたりした時に幹の代わりとなる枝が現れる性質

さらに文献 [3] では

- d. 屈地性 (geotropism) 枝が重力と反対の方向 (上方向) に曲がる性質
- を実現している。

しかし、このモデルはホルモンが平衡状態になるまで繰り返し計算を必要とするため、計算に時間がかかる。また、光環境の変化に応じてホルモンの生成量を変化させることもできない。そこで、本研究では以下のように、繰り返し計算を必要とせず、光環境の変化を考慮したホルモンのモデル化を行うこととした。

1. ホルモンは 1 種類のみ
2. ホルモンは新生枝でのみ生成
3. ホルモンの生成量は光環境モデルで求められる受光量に比例
4. ホルモンは枝先から幹、根の方向にのみ伝達
5. 新生枝は親枝の前年のホルモン量を継承

6. 頂生枝は側生枝より多くのホルモン量を親枝から継承

このホルモンモデルと、分枝モデル、光環境モデルを組み合わせることで、本研究では頂芽優勢、休眠芽の休眠打破、屈地性に加え、

e. 枝の短枝化 (change into a dwarf shoot) 頂芽優勢によって本来長く伸びるはずの枝がほんの僅かしか伸びない現象 (主に側生枝に起こる)

f. 屈光性 (phototropism) 枝が光の強い方向に曲がる性質

といった樹木の性質を再現することができる。

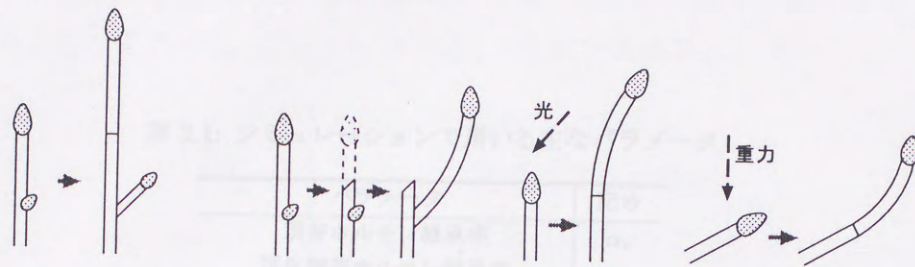
e. の枝の短枝化は現実の樹木ではほとんどの樹種で見られ、特にサクラやイチョウなどではかなり顕著に現れる性質であるが、短枝はただ短いだけではなく、花や枝葉のつき方が長枝と異なる場合があるため、従来のモデルで行なっている、頂芽優勢による側生枝の生長抑制だけでは正しく再現することはできない。本モデルでは花芽となる芽を区別して発芽を止めたり、長枝と短枝の側芽の発芽確率を変えることで枝の短枝化をより正しく再現している。

f. の屈光性は文献 [3],[4] の向日性 (heliotropism) と同じ性質である。向日性の実現のために文献 [4] では光の強い方向に、受光量に関係なく一定の割合で枝を回転させており、さらに文献 [3] では受光量によって屈曲率を調節しているが、現実の樹木では光を受けて生成されるホルモンの量や濃度差によって屈曲率が変化する [27] と考えられるので、本研究では屈光性をホルモン量で調節している。こうすることで、幹や勢いのある枝では屈光性が抑えられ、屈地性をより強調することができると考えた。また、枝の幹化は屈地性が強く現れる現象と考えられるので、特に考慮しなかった。

2.4 樹木の生長制御

本研究の生長モデルでは表 2.1 に示してある、様々なパラメータを用いて樹木の生長シミュレーションを行っており、その樹木一年分のシミュレーションの手順は次のようになる。

1. 新芽の発芽



頂芽優勢&枝の短枝化 休眠打破 屈光性 (負の) 屈地性

図 2.4: 樹木の性質

2. 各枝の受光量計算 (光環境モデル)
3. ホルモン量計算 (ホルモンモデル)
4. 枝の伸長と屈曲 (分枝モデル)
5. 翌年の発芽数計算 (休眠打破含む)

ここでは、このシミュレーションで行なっている樹木の生長制御の方法について説明する。

2.4.1 枝の枯死の制御

光環境の計算における枝の枯死の処理に関して、枝が枯死する受光量の閾値は、パラメータ $k \times 0.5 \sim 1$ の範囲で乱数を用いて変化させている。これは閾値を固定すると多くの枝が同時に枯れてしまうことがあるためである。

2.4.2 ホルモン量の計算

ホルモン量の計算は次のように行う。

Step 1. 枝 T_p から発芽した n 本の新生枝 $T_{c(i)}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) の初期ホルモン量 $H_{c(i)}^0$ は、枝 T_p の前年のホルモン量 H_p^0 の一部を継承するものとする。ただし、その

頂芽ホルモンの継承率、頂生側芽ホルモンの継承率、側芽ホルモンの継承率、新生枝のホルモン残存係数、古い枝のホルモン残存係数、光による短枝のホルモン生成係数、光による長枝のホルモン生成係数、親枝へのホルモン伝達率、枝短枝化閾値

表 2.1: シミュレーションで用いる主なパラメータ

パラメータ	記号
頂芽ホルモン継承率	α_t
頂生側芽ホルモン継承率	α_{tl}
側芽ホルモン継承率	α_l
新生枝のホルモン残存係数	β_c
古い枝のホルモン残存係数	β_p
光による短枝のホルモン生成係数	h_s
光による長枝のホルモン生成係数	h_l
親枝へのホルモン伝達率	γ
枝短枝化閾値	H_s
節数	N
節間長	D
頂芽数	B_t
頂生側芽数	B_{tl}
側芽数	B_l
葉序	ϕ
節屈曲角	θ_N
頂生枝分枝角	ψ_t
頂生側生枝分枝角	ψ_{tl}
側生枝分枝角	ψ_l
短枝の頂生側芽最大発芽確率	P_{tl}^s
長枝の頂生側芽最大発芽確率	P_{tl}^l
長枝の側芽最大発芽確率	P_l
屈光率	b_L
屈地率	b_g
節での枝屈曲最大角度	$\theta_{b_{max}}^N$
分枝角度変化の最大値	$\theta_{b_{max}}^b$
休眠打破を起こすホルモン閾値	H_b^l
休眠打破による発芽率	δ_l
最大休眠打破数	B_b^l
新芽のホルモン量	H_n^l
休眠打破を起こすホルモン変化率	h_b^d
休眠打破による発芽率	δ_d
最大休眠打破数	B_b^d
新芽のホルモン量	H_n^d

2.4.3 枝の生長と屈曲の制御

枝の生長と屈曲は次のように計算する。

継承率は $T_{c(i)}$ が頂生枝，頂生側芽が伸びた枝（頂生側生枝），側生枝の場合で異なるとし（それぞれ $\alpha_t, \alpha_{tl}, \alpha_l$ とする），次式で求める。

$$H_{c(i)}^0 = \begin{cases} \alpha_t H_p^0 & \text{頂生枝の場合} \\ \alpha_{tl} H_p^0 & \text{頂生側生枝の場合} \\ \alpha_l H_p^0 & \text{側生枝の場合} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$(0 \leq \alpha_t, \alpha_{tl}, \alpha_l \leq 1)$$

ここで， $H_{c(i)}^0 < H_s$ (H_s : 枝短枝化閾値) のとき，その枝は短枝， $H_{c(i)}^0 \geq H_s$ のとき，その枝は長枝と定義する。

Step 2. 光環境の影響を受けた後の新生枝 $T_{c(i)}$ のホルモン量 $H_{c(i)}$ は，枝の生長によって消費された初期ホルモン量 $H_{c(i)}^0$ の残存分 $\beta_c H_{c(i)}^0$ (β_c : 新生枝のホルモン残存係数) に，受光量 L に比例した，新しく生産されたホルモン量を加えたものとする。ただし，その量は枝が短枝の場合と長枝の場合では異なるとし（それぞれ $h_s L, h_l L$ (h_s, h_l : 光によるホルモン生成係数) とする），次式で決定される。

$$H_{c(i)} = \begin{cases} \beta_c H_{c(i)}^0 + h_s L & \text{短枝の場合} \\ \beta_c H_{c(i)}^0 + h_l L & \text{長枝の場合} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$(0 \leq \beta_c, L \leq 1)$$

また，光環境の影響を受けた後の枝 T_p のホルモン量 H_p は，初期ホルモン量 H_p^0 の残存分 $\beta_p H_p^0$ (β_p : 古い枝のホルモン残存係数) に，全ての子枝 $T_{c(1)}, T_{c(2)}, \dots, T_{c(n)}$ から伝達されたホルモン量 $\gamma \sum_{i=1}^n H_{c(i)}$ (γ : 親枝へのホルモン伝達係数) を加えたものとする。

$$H_p = \beta_p H_p^0 + \gamma \sum_{i=1}^n H_{c(i)} \quad (0 \leq \beta_p, \gamma \leq 1) \quad (2.3)$$

以下，枝 T_p からその親枝へ，さらにその親枝へと，枝先から幹に向かってホルモンが伝達されていく。

2.4.3 枝の生長と屈曲の制御

枝の生長と屈曲は次のように計算する。

Step 1. 枝の長さを定めるために、ホルモン量に応じて枝の節数 N と節間長 D を求める (図 2.5).

Step 2. 屈光性, 屈地性の程度を決める屈光率 b_L , 屈地率 b_g ($0 \leq b_L, b_g \leq 1$) を求める (図 2.6).

Step 3. 求められた屈光率 b_L , 屈地率 b_g および, 光環境の計算で求められた, 光の強い方向を示す単位ベクトル \mathbf{v}_L , 重力方向 (真下) の単位ベクトル \mathbf{v}_g から, 屈曲率 b と枝伸長目標ベクトル \mathbf{v}_b を次のように求める.

$$b = |b_L \mathbf{v}_L - b_g \mathbf{v}_g| \quad (2.4)$$

$$\mathbf{v}_b = \frac{b_L \mathbf{v}_L - b_g \mathbf{v}_g}{b} \quad (2.5)$$

但し, $b = 0$ のときは枝は屈曲しないので, 枝の生長のみを行なって終了する.

Step 4. 節 n_0 が親枝の分枝位置の節 n_p から伸びている方向 \mathbf{v}_{t_p} と, 枝伸長目標ベクトル \mathbf{v}_b との角度差 θ_{d_0} を次式で求める.

$$\theta_{d_0} = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{v}_{t_p} \cdot \mathbf{v}_b}{|\mathbf{v}_{t_p}| |\mathbf{v}_b|} \right) \quad (2.6)$$

Step 5. 節 n_0 の座標は, \mathbf{v}_{t_p} を次式で求められる枝曲げ角 θ_{b_0} だけ枝伸長目標ベクトル \mathbf{v}_b の方向に回転させた方向 \mathbf{v}_{t_0} に親枝の節 n_p の座標を節間長 D の距離だけ平行移動させた位置とする (仮軸分枝型の樹木の場合は節での屈曲角 θ_N 分さらに回転させて \mathbf{v}_{t_0} を決定する).

$$\theta_{b_0} = \begin{cases} b\theta_{d_0} & b\theta_{d_0} < \theta_{b_{\max}}^b \\ \theta_{b_{\max}}^b & b\theta_{d_0} \geq \theta_{b_{\max}}^b \end{cases} \quad (2.7)$$

($\theta_{b_{\max}}^b$: 分枝角度変化の最大値)

Step 6. $i := 1$

Step 7. 節 n_{i-1} が節 n_{i-2} ($i = 1$ では親枝) から伸びている方向 $\mathbf{v}_{t_{i-1}}$ と, 枝伸長目標ベクトル \mathbf{v}_b との角度差 θ_{d_i} を次式で求める.

$$\theta_{d_i} = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{v}_{t_{i-1}} \cdot \mathbf{v}_b}{|\mathbf{v}_{t_{i-1}}| |\mathbf{v}_b|} \right) \quad (2.8)$$

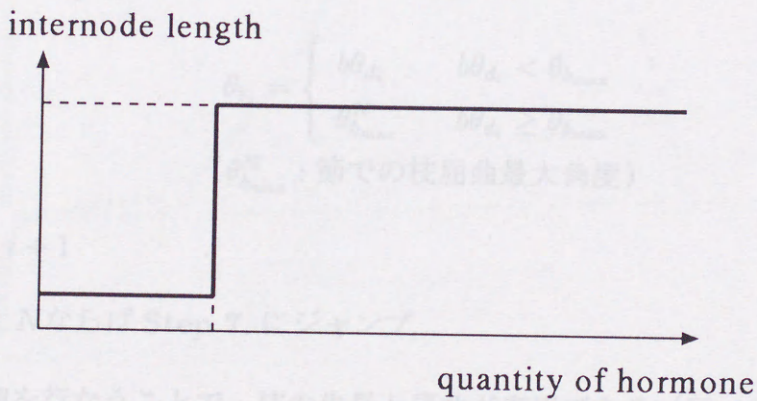
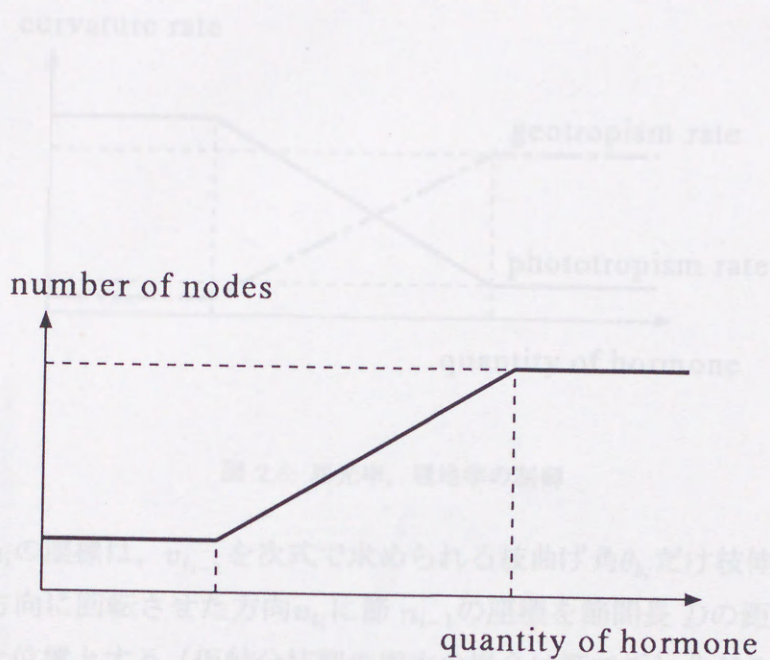


図 2.5: 枝の長さの制御

枝の太さの増加量は葉で作られる養分の量に比例していると考えられるが、本研究では処理を簡単にするため、1本の枝の太さは、その枝および、その枝の子枝の持つ全ての葉数に比例して断面積の増分を決定し、枝の前年の断面積に加えることで枝の太り具合を調節することにした。

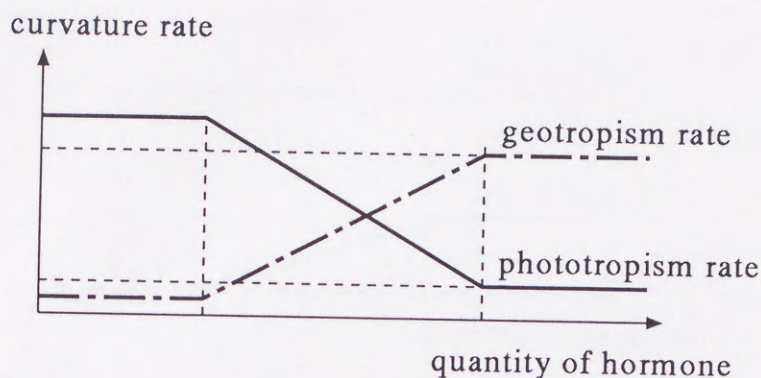


図 2.6: 屈光率, 屈地率の制御

Step 8. 節 n_i の座標は, $v_{t_{i-1}}$ を次式で求められる枝曲げ角 θ_{b_i} だけ枝伸長目標ベクトル v_b の方向に回転させた方向 v_{t_i} に節 n_{i-1} の座標を節間長 D の距離だけ平行移動させた位置とする (仮軸分枝型の樹木の場合は節で折れ曲がる角度分さらに回転させて v_{t_i} を決定する) .

$$\theta_{b_i} = \begin{cases} b\theta_{d_i} & b\theta_{d_i} < \theta_{b_{\max}} \\ \theta_{b_{\max}}^N & b\theta_{d_i} \geq \theta_{b_{\max}} \end{cases} \quad (2.9)$$

($\theta_{b_{\max}}^N$: 節での枝屈曲最大角度)

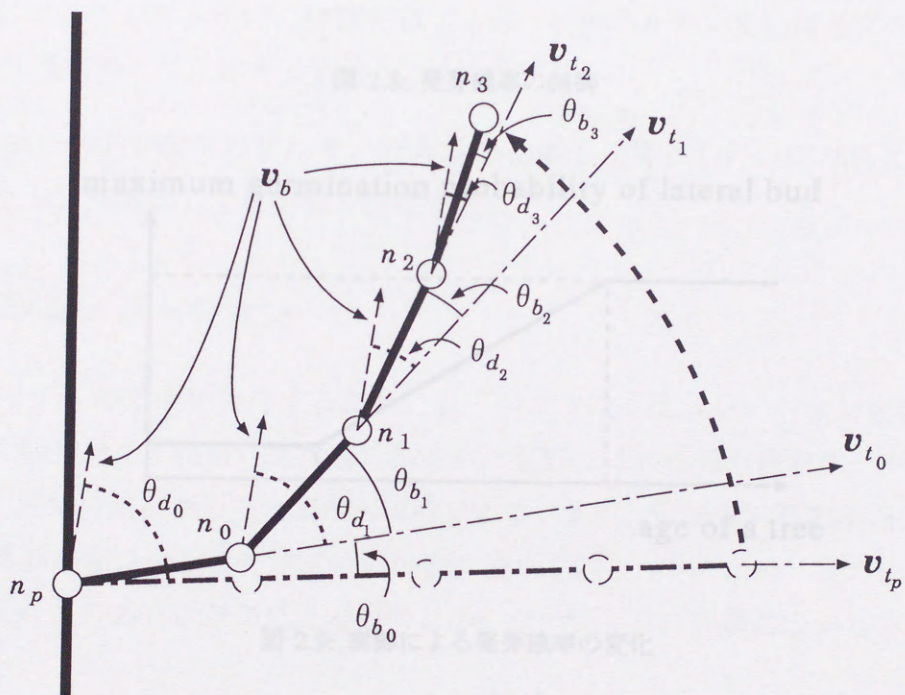
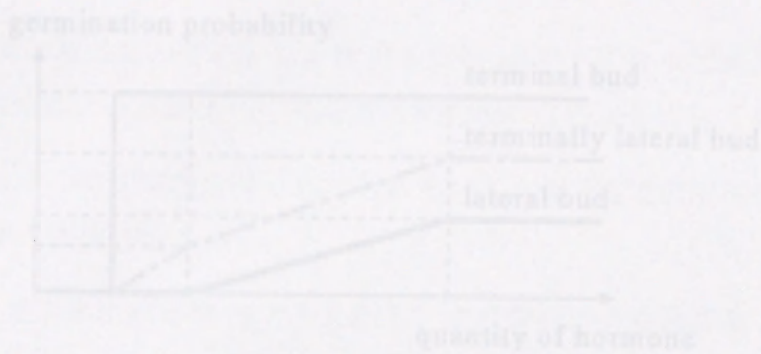
Step 9. $i := i + 1$

Step 10. $i < N$ ならば Step 7. にジャンプ.

以上の処理を行なうことで, 枝の生長と屈曲が表現できる (図 2.7) .

2.4.4 枝の太さの制御

枝の太さの増加量は葉で作られる養分の量に関係していると考えられるが, 本研究では処理を簡単にするため, 1 本の枝の太さは, その枝および, その枝の子枝の持つ全ての葉数に比例して断面積の増分を決定し, 枝の前年の断面積に加えることで枝の太り具合を調節することにした.



2.4.5 翌年の発芽数の制御

新生枝から次の年に発芽する芽、側芽それぞれについて枝のホルモンの量に応じて発芽確率を求め（図2.5）、全ての芽について発芽するかどうかをチェックし、発芽数を決定する。

このとき、頂生側芽、側芽の発芽確率が大きければ頂芽優勢は弱まり、小さければ頂芽優勢は強まる。

また、街路樹等で見られる、下枝を固定されて長く幹の伸びた木を表現するため、今回は側芽の発芽確率を年毎に少しずつ変化させることで表現した（図2.9）。

2.4.4 休眠打破の制御

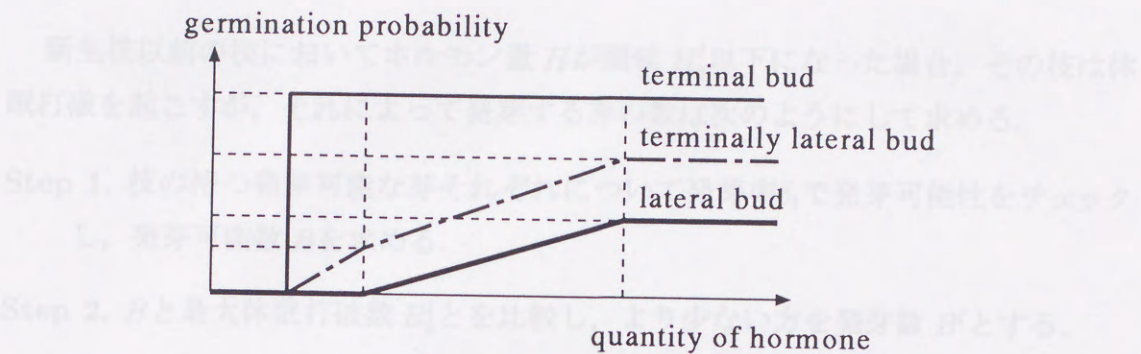


図 2.8: 発芽確率の制御

ホルモン量が前半のホルモン量から急激に増えた場合、その枝は休眠打破を起す。

2.5 シミュレーション

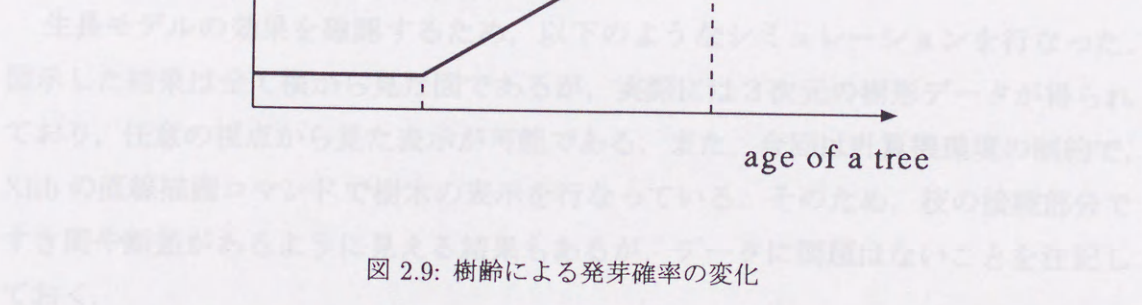


図 2.9: 樹齢による発芽確率の変化

2.4.5 翌年の発芽数の制御

新生枝から次の年に発芽する芽は、頂芽、頂生側芽、側芽それぞれについて枝のホルモン量に応じて発芽確率を求め (図 2.8), 全ての芽について発芽するかどうかをチェックし、発芽数を決定する。

このとき、頂生側芽、側芽の発芽確率が大きければ頂芽優勢は弱まり、小さければ頂芽優勢は強まる。

また、街路樹等で見られる、下枝を剪定されて長く幹の伸びた木を表現するため、今回は側芽の発芽確率を年毎に少しずつ変化させることで対応した (図 2.9)。

2.4.6 休眠打破の制御

新生枝以前の枝においてホルモン量 H が閾値 H'_b 以下になった場合、その枝は休眠打破を起こすが、それによって発芽する芽の数は次のようにして求める。

Step 1. 枝の持つ発芽可能な芽それぞれについて発芽率 δ_i で発芽可能性をチェックし、発芽可能数 B を求める。

Step 2. B と最大休眠打破数 B'_b とを比較し、より少ない方を発芽数 B' とする。

Step 3. ホルモン計算時に、休眠打破する芽の初期ホルモン量には通常のホルモン継承量に加えて、ホルモン量 H_n^d を与える。

ホルモン量 H が前年のホルモン量 H' から急減した場合 ($H < H'/h'_b$) にも休眠打破は発生し、同様にして発芽数を決定する。

2.5 シミュレーション

生長モデルの効果を確認するため、以下のようなシミュレーションを行なった。図示した結果は全て横から見た図であるが、実際には3次元の樹形データが得られており、任意の視点から見た表示が可能である。また、今回は計算機環境の制約で、Xlibの直線描画コマンドで樹木の表示を行なっている。そのため、枝の接続部分ですき間や断差があるように見える結果もあるが、データに問題はないことを注記しておく。

2.5.1 様々な分枝パターンの表現

ここでは分枝モデルに与えるパラメータを変えることでどのような分枝パターンが生成できるかを示す。光、ホルモンの影響による枝の除去、屈曲は考慮していない。図 2.10(a) は単純な2分岐パターン、(b) は2/5の互生葉序をもつ単軸分枝、(c) は1/2の互生葉序をもつ仮軸分枝、(d) は1/3の互生葉序をもつ単軸分枝だが、頂芽と頂生側芽のみが発芽しており、輪生葉序のようにになっている例である。

(a) のような分枝をする樹木は現実には存在しない。原始的なシダ植物の一部で見られる程度である。(b),(c),(d) は現実の樹木の代表的な分枝パターンである。特

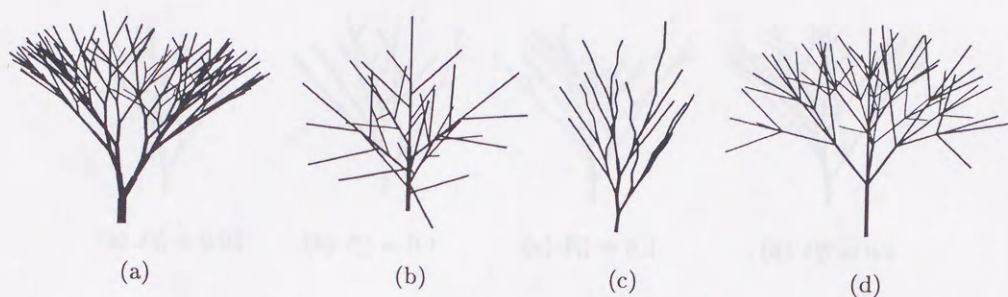


図 2.10: 様々な分枝パターン

に、ツツジやコナラのように頂生側生枝が発達し、側生枝が抑制される樹種を表現するには側芽と頂生側芽を分けて考えることが不可欠であり、本研究の分枝モデルでは広葉樹に関しては大部分の樹種の方枝パターンを再現することが可能である。

また針葉樹にも、マツのように頂芽と頂生側芽が伸び、側芽が発達しない樹種が数多くあるため、これを表現するのに頂生側芽を導入することが有効である。

2.5.2 ホルモンによる樹木の性質の再現

ここではホルモンの影響による様々な樹木の性質の再現例を示す。

分枝モデルには図 2.10(a) と同様の 2 分岐パターンを与えている。この 2 分岐パターンのパラメータは表 2.2 の通りである。ただし、ここではホルモンの影響のみを示すため、光による影響は全て無視している。また、枝の屈曲も行っていない。

図 2.11, 図 2.12 はともに頂芽優勢の効果を示した例である。図 2.11 は短枝の頂生側芽最大発芽確率 P_{ii}^s を変更した例、図 2.12 は頂生側生枝のホルモン継承率 α_{ii} を変更した例である。どちらも値が大きいほど分枝が多くなっているが、図 2.12 の方が分枝回数の差が大きい。これは、実際の頂生側芽発芽確率は、図 2.8 のように枝のホルモン量が短枝の閾値以下の時は P_{ii}^s 以下、閾値以上の時は P_{ii}^s 以上になるため、ホルモン継承率 α_{ii} の方がより支配的なパラメータとなっているからである。

図 2.13 は頂芽優勢と枝の短枝化を組み合わせた例である。この例は図 2.11, 2.12 と条件はほとんど同じだが、分枝モデルに与えるパラメータのうち、短枝の節間長 D_s を長枝の節間長 D_l に対して (a), (d) 同じ長さ、(b), (e) 1/2 の長さ、(c), (f) 1/4 の長さ と変更してシミュレーションを行なった。枝の短枝化を取り入れることで、

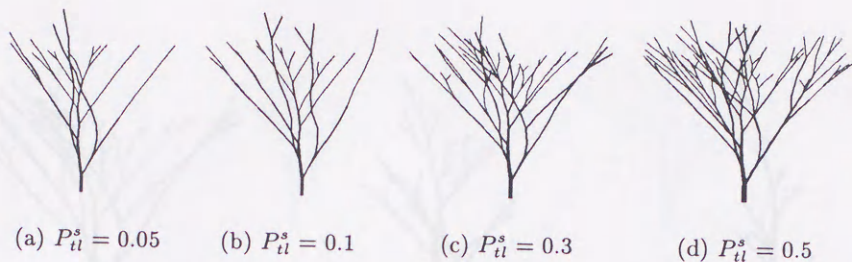


図 2.11: 頂芽優勢 (短枝の頂生側芽最大発芽確率の変更)

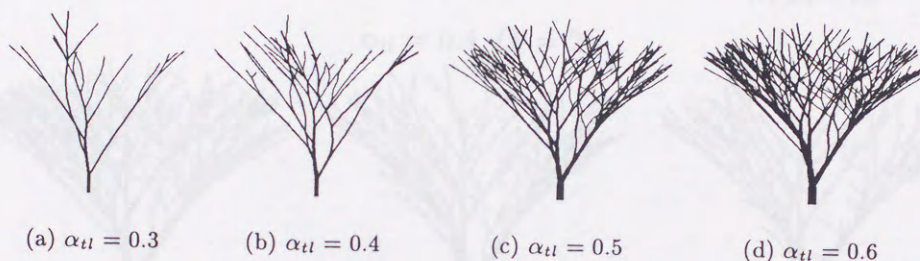


図 2.12: 頂芽優勢 (頂生側生枝のホルモン継承率の変更)

図 2.11, 2.12では分からなかった, 幹の存在がはっきりと確認できる. また, 頂生側生枝のホルモン継承率 α_{ii} によって幹の数が変わることが分かる.

図 2.14は休眠打破の例である. この例も光の影響の考慮や枝の屈曲は行っていないが, 枝の短枝化は行なっている. (a)は休眠打破を行なわない例, (b)はホルモン量が急減した場合のみ休眠打破を行なった例, (c)はホルモン量が閾値以下になった場合に休眠打破を行なった例, (d)は(b), (c)の両方を取り入れた例である. この例では, 受光量不足による枝の枯死や剪定による枝の除去を行なっていないので, (b)の結果は(a)ときほど変わらない. (c), (d)は過去に発芽しなかった芽が休眠打破によって発芽し, 根本に近い位置で枝が増えていることが分かる.

図 2.15は剪定を行なった時の休眠打破の例である. (a)の10年目の時点で, 7年目以降に生長した枝を全て除去してある. その後, (b), (c), (d)と時を経るごとに新たな枝が増え, 再び生長しているのが確認できる.

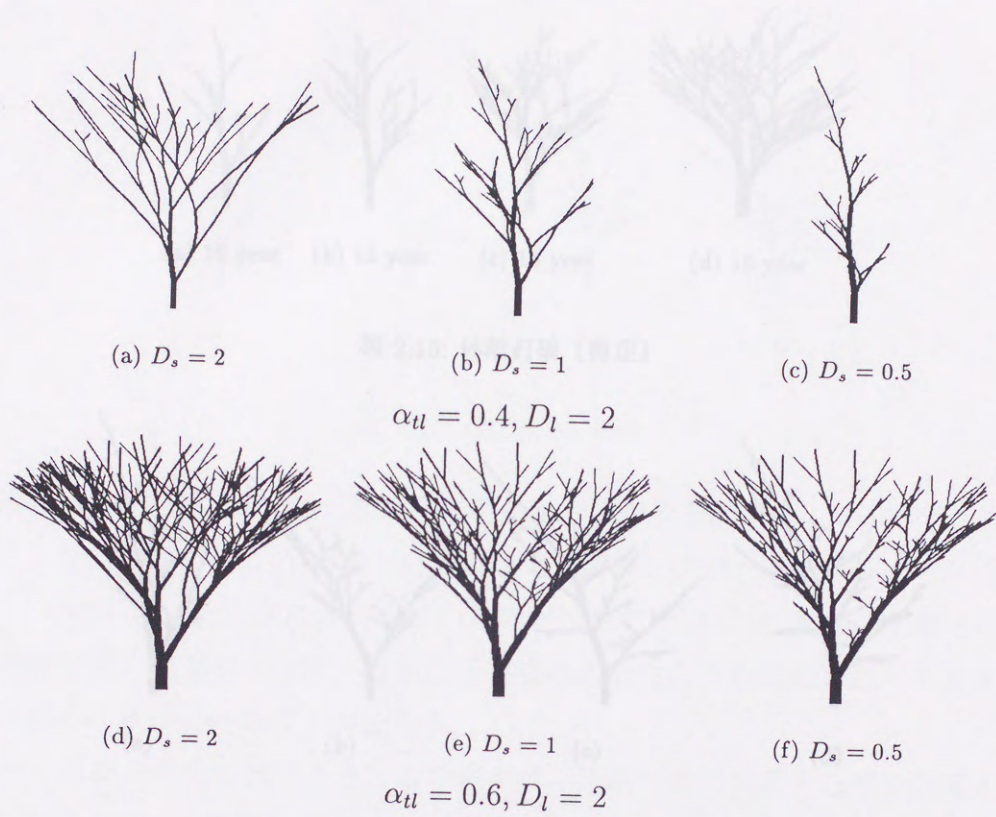


図 2.13: 頂芽優勢&枝の短枝化

2.5.3 環境、ホルモンの影響

ここでは環境とホルモンが樹木の生長に与える影響の例を示す。以下の例では、光環境の考慮、頂芽優勢と枝の短枝化を取り入れている。

図 2.14 は光環境の例である。(a) は枝の屈曲なし、(b) はホルモン量に関係なく一方向に成長する、(c) はホルモン量に敏感な場合、(d) はホルモン量に敏感で、(a) と (b) の両方の方向に成長しているが、最も枝も同じ方向に曲がっている。(c) では、上に伸びた枝は上向のままで、根本の方には尤も強い方向に曲がっているのが確認できる。(d) では、根本の方の枝は (c) とさほど変わらないが、ホルモンの多い枝は (c) はど曲がらず、より上向きに生長していることが分かる。

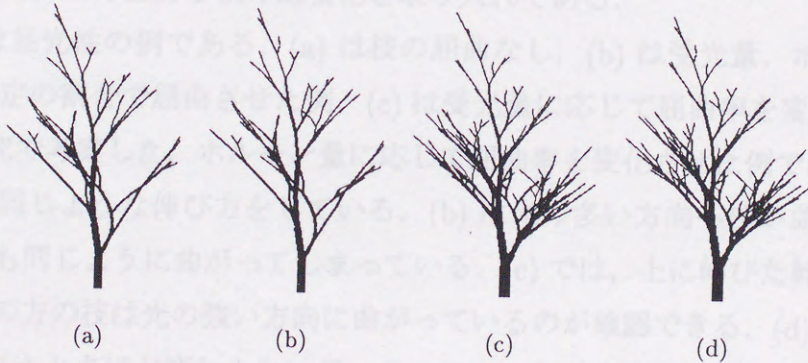


図 2.14: 休眠打破

図 2.17 は根光性と異地性の例である。(a) は枝の屈曲なし、(b) は根光性のみ、(c)

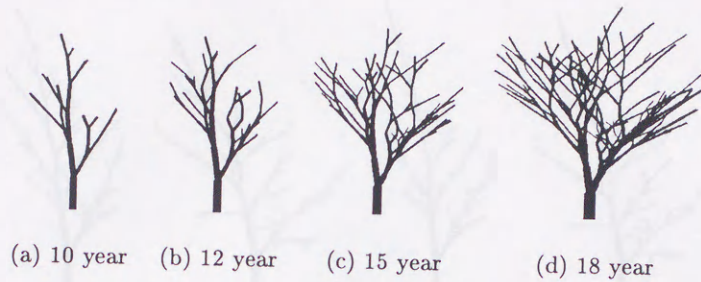


図 2.15: 休眠打破 (剪定)

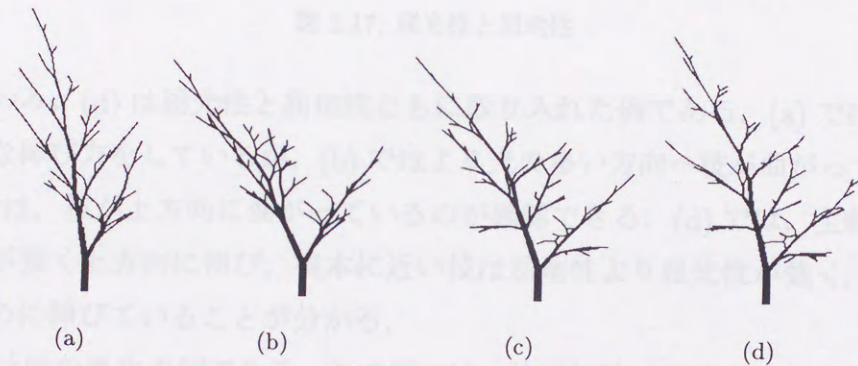


図 2.16: 屈光性

2.5.3 環境, ホルモンの影響

ここでは環境とホルモンが樹木の生長に与える影響の例を示す. 以下の例では, 光環境の考慮, 頂芽優勢と枝の短枝化を取り入れてある.

図 2.16は屈光性の例である. (a) は枝の屈曲なし, (b) は受光量, ホルモン量に関係なく一定の割合で屈曲させた例, (c) は受光量に応じて屈曲率を変化させた例, (d) は本研究で考案した, ホルモン量に応じて屈曲率を変化させた例である. (a) ではどの枝も同じような伸び方をしている. (b) は光の多い方向へ枝が曲がっているが, 幹も枝も同じように曲がってしまっている. (c) では, 上に伸びた幹は上向のまま, 根本の方の枝は光の強い方向に曲がっているのが確認できる. (d) では, 根本の方の枝は (c) とさほど変わらないが, ホルモンの多い幹は (c) ほど曲がらず, より上向きに生長していることが分かる.

図 2.17は屈光性と屈地性の例である. (a) は枝の屈曲なし, (b) は屈光性のみ, (c)



図 2.17: 屈光性と屈地性

は屈地性のみ、(d)は屈光性と屈地性ともに取り入れた例である。(a)ではどの枝も同じような伸び方をしているが、(b)ではより光の多い方向へ枝が曲がっている。また、(c)では、枝が上方に曲がっているのが確認できる。(d)では、主軸となる枝は屈地性が強く上方に伸び、根本に近い枝は屈地性より屈光性が強く、光を求めて枝が斜めに伸びていることが分かる。

図 2.18は幹の再生の例である。この例では、休眠打破で発芽する芽を確保するため、1世代で伸びる節間を二つにし、中間の節にできる芽が休眠芽となるように分枝規則を変更した。(a)は10年目の樹木の例、(b)は(a)の幹を剪定した例、(c)は(a)をそのまま15年目まで生長させた例、(d)は(b)を15年目まで生長させた例である。幹を剪定しても他の枝や休眠打破によって新たに発芽した枝が勢いよく伸び、幹が再生していることが分かる。

2.5.4 様々な樹種の生成

ここでは現実の樹種を想定した樹木の生成例を示す。

樹種は、街路樹や植木としてよく見られ、樹形が互いに全く異なるものが良いと考え、サクラ、ケヤキ、ツツジの三つを選んだ。

サクラの特徴は

- 長枝と短枝の長さが非常に異なる。長枝は数10cmにもなるが、短枝は1cmにも満たないことが多い。

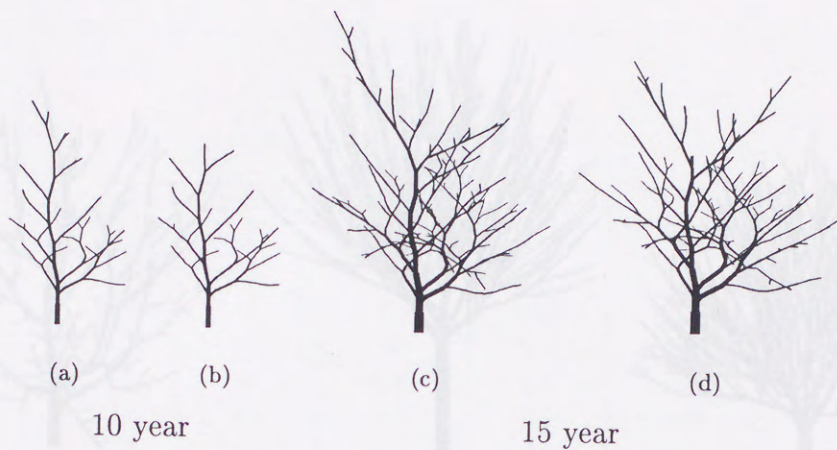


図 2.18: 幹の再生

- 頂生側芽と側芽の区別はない。
- 長枝の芽は大部分が葉芽で、花芽はできにくく、頂芽は発芽すると長枝となり、側芽は発芽すると短枝になりやすい。
- 短枝の頂芽は葉芽で、発芽すると短枝になり、側芽は花芽で、発芽すると花となる。
- 休眠打破によって太い幹から新しい枝が生えることがある。

ケヤキの特徴は

- 長枝の長さは短枝の数倍程度。
- 仮軸分枝型の樹木のため、頂芽、頂生側芽はない。その代わりに、枝先に最も近い側芽が頂芽のような性質を持つ（仮頂芽という）。
- 分枝しやすい。

ツツジの特徴は

- 長枝と短枝の差はあまりない。
- 頂生側芽は 3, 4 個つく。

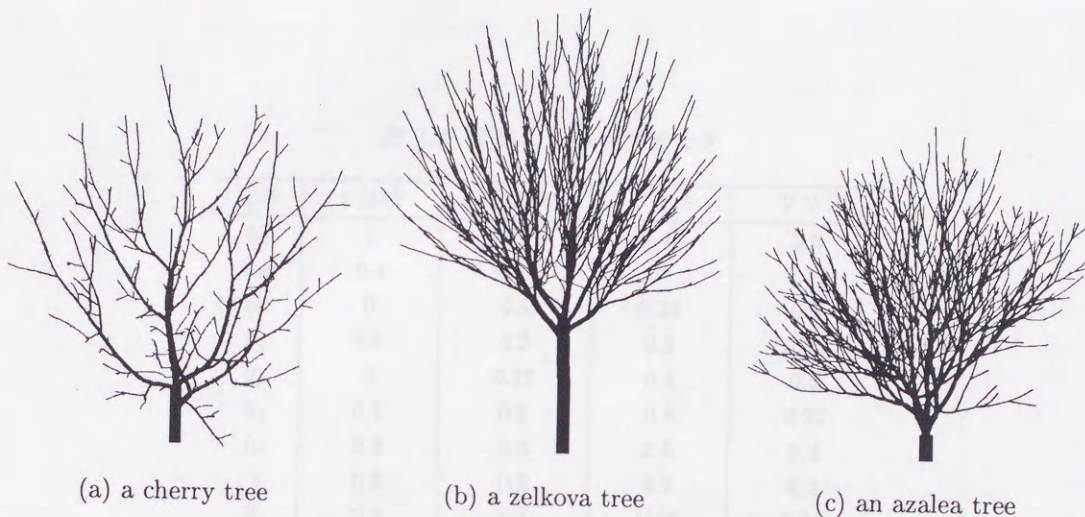


図 2.19: 本研究モデルによる樹木の生成例

- 頂芽と頂生側芽は発芽しやすく、側芽は抑制されてほとんど発芽しない。
- 頂生枝と頂生側生枝の長さの差はあまりない。

これらの特徴を元にパラメータを表 2.2 のように定め、シミュレーションを行なった。その結果を図 2.19 に示す。(a) はサクラ、(b) はケヤキ、(c) はツツジを想定した樹木の生成例である。

(a) のサクラの生成例では頂生枝が長枝となって勢いよく伸びており、側生枝はごく短い短枝になることが多いことが確認できる。また、休眠打破によって太い枝から小枝がいくつか伸びていることも分かる。

(b) のケヤキの生成例では初めは幹を伸ばすために側芽の発芽を抑制しているので分枝せずに幹が長く伸びているが、その後枝が細かく分枝しており、全体にホウキを逆さに立てたような樹形になっている。

(c) のツツジの生成例では長枝、短枝の差があまりなく、全体に丸い樹形になっていることが分かる。

図 2.20 は図 2.19 の樹木の樹高の生長を示したグラフである。樹高の単位はセンチメートルである。どの樹木も 15 年間にわたるシミュレーションを行なったが、樹高は樹種の違いに応じて生長していることが分かる。また、表 2.3 に各樹種の計算時間

表 2.2: 樹種ごとのパラメータ

記号	2分岐	サクラ	ケヤキ	ツツジ
α_t	1	0.7	0.45	0.6
α_{tl}	0.4	0.55	0	0.55
α_l	0	0.4	0.34	0.3
β_c	0.8	0.2	0.3	0.15
β_p	0	0.25	0.4	0.3
h_s	0.1	0.2	0.5	0.25
h_l	0.3	0.5	0.6	0.4
γ	0.5	0.2	0.2	0.2
H_s	0.5	0.1	0.25	0.15
N	1	6 ~ 25	7 ~ 10	4 ~ 6
D	1 ~ 2cm	0.2 ~ 3cm	2 ~ 5cm	1.5 ~ 2cm
B_t	1	1	1	1
B_{tl}	1	1	0	3
B_l	0	1	1	1
ϕ	1/2	2/5	1/2	2/5
θ_N	0	0	6	0
ψ_t	-10	0	4	0
ψ_{tl}	30	45	0	25
ψ_l	0	45	20	20
P_{tl}^s	0.3	0	0	0.2
P_{tl}^l	1	0.9	0	0.75
P_l	0	0.1 ~ 0.6	0.02 ~ 0.7	0
b_L	0.3 ~ 0.05	0.12 ~ 0.01	0.13 ~ 0.1	0.12 ~ 0.03
b_g	0 ~ 0.2	0.01 ~ 0.02	0.1 ~ 0.14	0.1 ~ 0.07
$\theta_{b_{\max}}^N$	0	15	4	10
$\theta_{b_{\max}}^b$	90	20	2	3
H_b^i	0.2	0.05	0	0
δ_l	0.5	0.3	0	0
B_b^l	1	2	0	0
H_n^l	0.2	0.3	0	0
h_b^d	2	4	5	3
δ_d	0.5	0.35	0.3	0.8
B_b^d	1	2	1	3
H_n^d	0.5	0.4	0.3	0.5

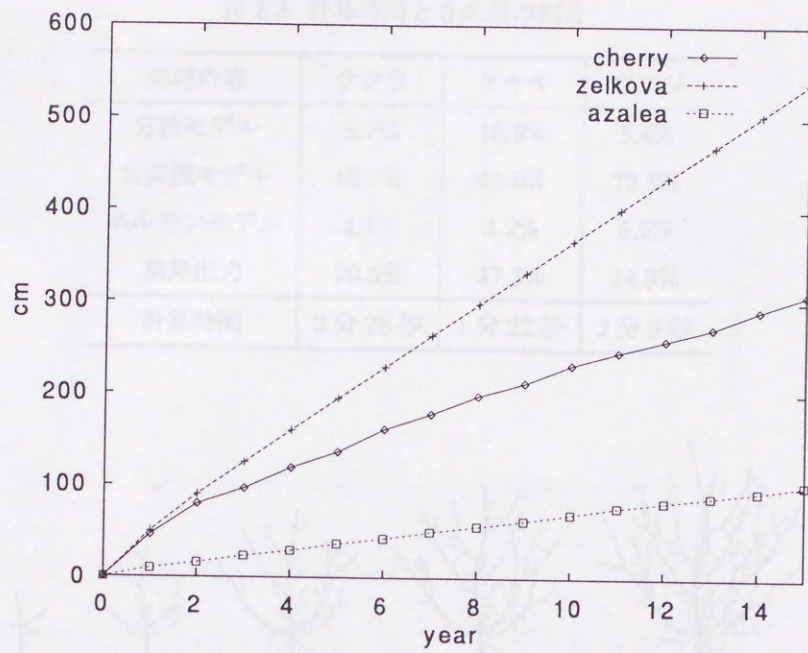


図 2.20: 樹高の生長

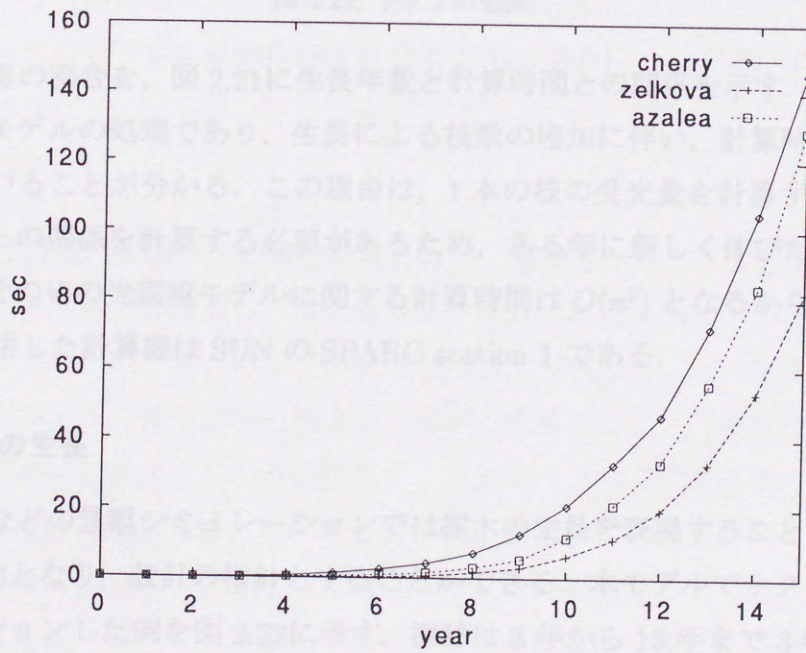


図 2.21: 生長と計算時間との関係

表 2.3: 計算時間と各処理の割合

処理内容	サクラ	ケヤキ	ツツジ
分枝モデル	5.7%	10.9%	5.4%
光環境モデル	69.7%	48.6%	73.8%
ホルモンモデル	4.1%	3.2%	5.9%
結果出力	20.5%	37.3%	14.9%
計算時間	2分26秒	1分22秒	2分9秒

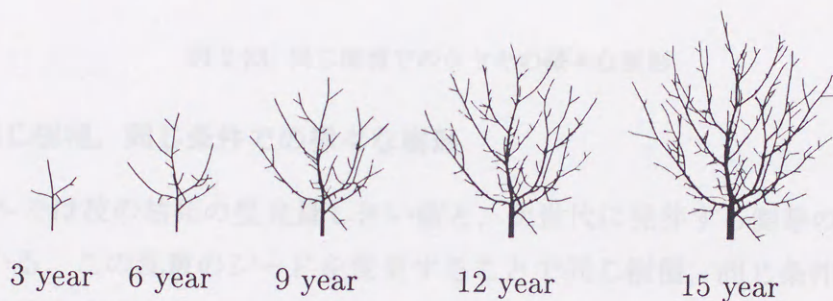


図 2.22: サクラの生長

とその処理毎の割合を、図 2.21 に生長年数と計算時間との関係を示す。計算の大部分は光環境モデルの処理であり、生長による枝数の増加に伴い、計算時間が 2 次的に上昇していることが分かる。この理由は、1 本の枝の受光量を計算するために他の全ての枝との関係を計算する必要があるため、ある年に新しく伸びた枝の数を n とすると、その年の光環境モデルに関する計算時間は $O(n^2)$ となるからである。

なお、使用した計算機は SUN の SPARC station 1 である。

2.5.5 樹木の生長

庭園設計などの景観シミュレーションでは樹木の生長を表現することで将来の景観予測が可能となり、設計の指針とすることができる。本モデルでサクラの生長をシミュレーションした例を図 2.22 に示す。樹齢は 3 年から 15 年まで 3 年おきに表示している。時間の経過に対応して樹木が生長している様子が分かる。

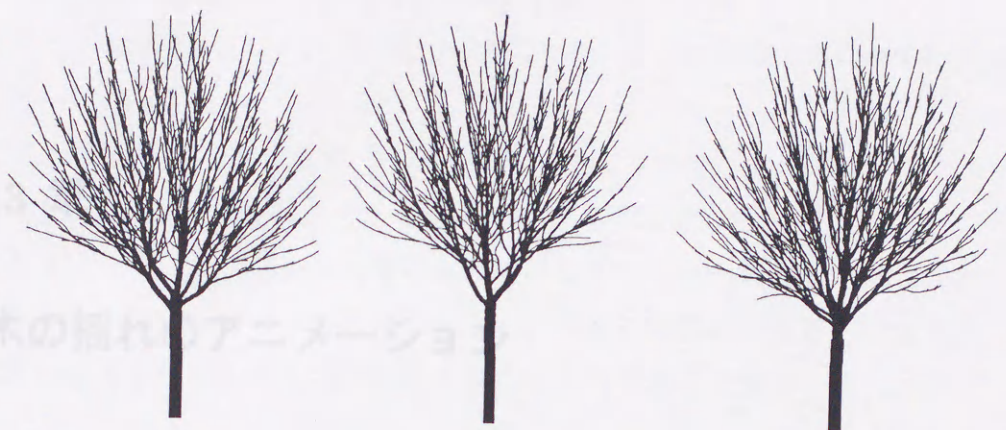


図 2.23: 同じ環境でのケヤキの様々な樹形

2.5.6 同じ樹種、同じ条件での様々な樹形

本モデルでは枝の枯死の受光量しきい値と、次世代に発芽する側芽の選択に乱数を用いている。この乱数のシードを変更することで同じ樹種、同じ条件でも微妙に異なった樹形を生成することができる。乱数のシードを変えて生成したケヤキの例を図 2.23 に示す。街路樹のように個々の樹木の環境の変化が少ない場所で、同じ樹種でも微妙に形の違う木を多数生成する必要がある場合はこの方法が有効である。

2.6 まとめ

本章では光環境の影響による枝の枯死と屈曲、植物ホルモンによる樹木の様々な性質の再現、樹木の分枝規則の正確な再現を、それぞれ光環境モデル、ホルモンモデル、分枝モデルという三つのサブモデルを用いて実現した、様々な樹種をリアルに生成できる樹木の生長モデルを作成し、樹木の性質の再現と、現実の樹木の生長シミュレーションを行なった。その結果、この生長モデルで頂芽優勢、休眠芽の休眠打破、枝の短枝化、屈光性、屈地性といった、樹木の性質の再現が可能であることを確認し、また、現実に存在する、様々な異なった樹種が生成可能であることを確認した。さらに、樹木の生長過程の表現や、同一の樹種で微妙に異なる樹形の生成も可能とした。

第 3 章

樹木の揺れのアニメーション

3.1 はじめに

近年の 3 次元コンピュータグラフィック（以下 CG）技術の進歩はめざましいものがある。映画やコマーシャルで見かける映像の中には一見して CG とは分からないようなものも増えてきた。また、建築設計やドライビングシミュレータなどで 3 次元 CG を目にすることも多くなってきた。ゲームなどでも 3 次元 CG はごく一般的に用いられるようになりつつある。

3 次元 CG を用いる利点の一つに、一度 3 次元データを作成すれば自由な視点で何度でも映像を作成することができるという点がある。しかし、リアルな映像を得るためにはデータの作成が重要になってくる。特に、複雑な形をした自然物や自然現象を表現することはリアルな映像を作るためには大変重要で、アニメーションとなると形だけでなく動きもリアルでなければならない。そこで、自然の物体の動きをモデル化してシミュレーションを行うことが重要となる。

映画などでは、人間の動きをコンピュータに取り込む手法として、モーションキャプチャーという技術がさかんに使われるようになってきた。この方法は人間の動作をデータとして取り込むには非常に有効であるが、人間以外の動物や、樹木などの自然の物体の動きをデータ化するのに使用することは困難である。

樹木の場合、CG による画像生成の研究はさまざまな研究者によってなされてきたが、それらの多くは樹形を生成する生長モデル [2, 23, 13, 3, 11] や、テクスチャの生成に関する研究 [17] であり、風などの外部からの力による樹木の揺れの表現に

については数件の報告が見られるのみである [24, 14].

そこで、樹木の揺れをモデル化してアニメーションを作成する手法の研究に取り組んだ。

研究の方針としては、まず、多様な樹形に対応できること、一つのモデルでそよ風のような弱い風から台風のような強風まで対応可能であること、そして、スーパーコンピュータやグラフィックス専用機を用いなくても、一般的なパソコンやワークステーションでプレビューが可能なくらい、高速に計算を行えることを目指し、物理現象の忠実な再現よりも人間の目で見たとときの自然さを重視した。

3.2 樹木の運動のモデル化の方針

樹木の揺れを再現するには、樹木の運動、風の流れの2つをモデル化する必要がある。風のモデルに関しては既に流体のシミュレーション手法が数多く存在するので、それらを使用することができる。問題は、樹木の運動のモデル化で、これに関しては従来あまり研究は行なわれていない。

樹木の揺れを物理的に再現するには次の2つの方法が考えられる。

1. 枝の振動の式を作成し、解を求める方法

2. 樹木全体を細かくメッシュ状に分割し、変形による力の計算を行なう方法

1. は式さえできれば最も物理的に正確な揺れが再現できるが、樹形が複雑になればなるほど式をたてるのは困難になる。また、柳のような柔軟な枝では揺れが振動ではなく、二重振り子のようにカオス的なふるまいをすることも予想されるため、振動の式では再現できない。

2. は計算機に適した方法であるが、樹木のような複雑な物体では分割数が非常に多くなり、非常に多くの計算時間がかかる。

そこでそれぞれ以下のように簡略化した手法が提案されている。

文献 [24] のモデルでは樹木の各枝を弾性体と考え、モード解析の手法 [20] を用いてあらかじめ枝の振動の近似解をもとめておくことで、比較的高速に樹木の揺れの運動計算を行うことが可能であるが、この手法で表現できるのは竹のようなまっす

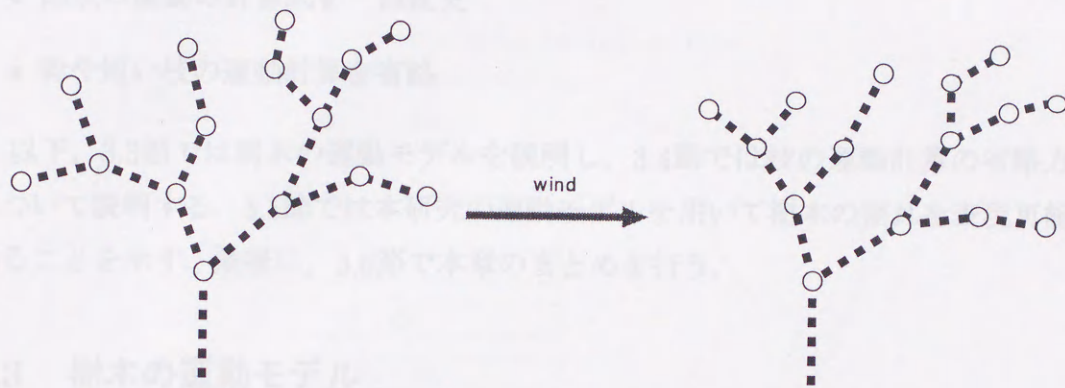


図 3.1: 樹木の節点モデルによる表現

ぐで太さが一定の樹種しか表現できず、またやはり柳のように柔軟な枝の表現は不可能である。

文献 [14] のモデルでは質量を持った節点 (node-point) とそれらの隣接関係で樹木を表し、風から受ける力による節点位置のずれを補正する方向に復元力を与えることで全体として樹木形状を崩さずにそれぞれの枝が動く様子が表現できる (図 3.1)。しかし、複雑な樹形や枝が細かく分岐する樹種を表現するには多くの節点を必要とし、結果として計算時間が増大してしまう。また、このモデルは節点間がバネで結ばれていると仮定するモデルを用いているため、強風のシミュレーションを行うと枝長が本来の長さから変化してしまったり、場合によっては発散してしまうという問題がある。

本章では文献 [14] のモデルを元に、以下のような改良を施すことでモデルをより高速で汎用的なものとし、樹木の揺れのアニメーションを実現した。

- 節点数の制限の処理の追加 (3.3.1節)
- 節点のパラメータはデータを反映して設定 (3.3.1節)
- 重力の影響を追加 (3.3.2節)
- 方向のずれの復元力の計算を変更 (3.3.2節)
- 距離のずれは常に初期状態に修正 (3.3.2節)

- 節点の運動の計算式を一部変更
- 幹や短い枝の運動計算を省略

以下、3.3節では樹木の運動モデルを説明し、3.4節では枝の運動計算の省略方法について説明する。3.5節では本研究の運動モデルを用いて樹木の揺れを表現可能であることを示す。最後に、3.6節で本章のまとめを行う。

3.3 樹木の運動モデル

樹木の揺れのシミュレーションを実現するための本研究の運動モデルは基本的には文献 [14] のモデルと同様、樹木を節点という質量を持った点とその隣接関係で表現しているが、節点のパラメータや隣接関係には多くの違いがある。節点の質量や表面積、さらに樹木が変形した時の復元力の係数などのパラメータは入力された元の樹形データから設定している。また、節点間はバネではなく、質量、表面積 0 の変形しない棒で接続されており、棒の方向は節点位置で変化するが、元の方向に近づくように節点に力を与えている。イメージとしては、節点は継ぎ手で、それを介して複数の棒がつなぎ合わさって樹形を形作っていると考えられる。

以下、この運動モデルについて解説する。

3.3.1 樹木データと節点の設定

樹木データとしては2章の方法による出力結果を用いることにした。モデルに与える樹木データは図 3.2 のような構造になっている。枝 (branch) は複数の節 (node) から成っている。節は枝や葉が生える部分で、枝の座標も兼ねている。同時期に生えた枝は同じ世代 (generation) として管理される。また、各枝は親枝を示すポインタを持っており、親から子へはポインタを持たない。

ただ、この方法で得られる樹木データは枝や節の数が非常に多いため、これを直接節点モデルに用いると計算にかなりの時間がかかる。そこで、質量を持つ節点は各世代毎の枝の先端のみとし、中間の節から生えている枝については元の枝長と枝の分枝点までの長さの比をもとに中間点を近似することにした (図 3.3)。但し、ア

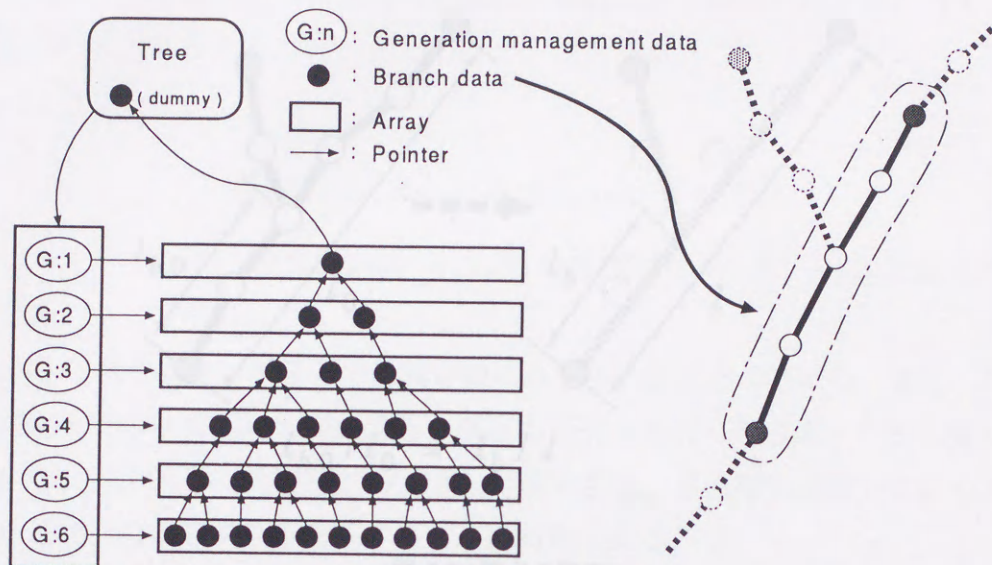


図 3.2: 樹木データの構造

ニメーション表示時には元の節点データを用いて枝を正しく表示できるようにしている (3.3.3節).

節点間を接続する棒は質量, 表面積ともに 0 と仮定している, 各枝の持つ質量, 表面積は各節点の質量, 表面積として与えることにし, 節点 P_i の質量 m_i , 表面積 s_i を,

$$m_i = \pi d_i^2 l_i \delta, \quad (3.1)$$

$$s_i = 2\pi d_i l_i \quad (3.2)$$

として求めた. ここで, l_i は節点 P_i の属する枝の長さ, d_i は枝の半径, δ は枝の密度である.

但し, 葉がついている場合はその質量, 表面積を考慮する必要がある. 本稿では葉がつく枝を最も若い世代の枝のみとし, 1つの節に1枚の葉がつくものとしている. 実際の樹木では1つの節に数枚の葉がつく樹種もあるが, その場合は葉の質量, 表面積を枚数分だけ増やすことで対応することにした. 葉がついている場合の節点 P_i の質量 m_i , 表面積 s_i は,

$$m_i = \pi d_i^2 l_i \delta + n_i m_{\text{leaf}}, \quad (3.3)$$

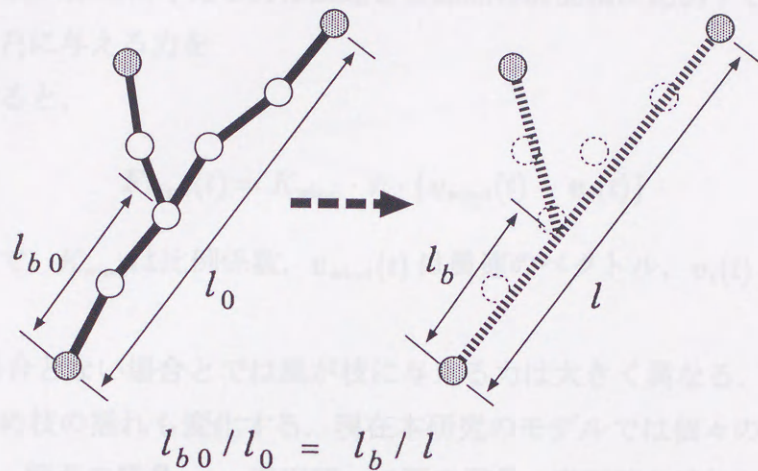


図 3.3: 節点の設定

$$s_i = 2\pi d_i l_i + n_i s_{\text{leaf}} \quad (3.4)$$

として求めた. n_i は節点 P_i の属する枝が保持する葉数(枝の節数), m_{leaf} は1枚の葉の質量, s_{leaf} は1枚の葉の表面積である.

3.3.2 樹木の変形と節点の運動の計算

節点モデルでは, 節点が移動することにより位置関係が変化し, その変化を打ち消そうとする方向に復元力が働いて節点が移動する. また, 強い力によって枝が伸縮するのを防ぐため, 節点間の距離に関しては常に初期状態と同じ長さを保つように位置の再計算を行っている.

外力の計算

樹木は外部から力を受けることで運動する. 外部からの力をここでは外力とよぶことにする. 外力としては風, 重力, 雨等の自然界からの力や, 盆栽などで行われる人手による枝の変形等が考えられるが, 現在本モデルで与えられる外力は風と重力の2つである. 本研究では次のような簡単な方法で風が樹木に与える力を計算した.

・風による力 風が節点に与える力は風速と各節点の表面積に比例すると考え、時刻 t に風が節点 P_i に与える力を $F_{\text{wind}}(t)$ とすると、

$$F_{\text{wind}}(t) = K_{\text{wind}} \cdot s_i \cdot \{v_{\text{wind}}(t) - v_i(t)\} \quad (3.5)$$

となる。ここで、 K_{wind} は比例係数、 $v_{\text{wind}}(t)$ は風速のベクトル、 $v_i(t)$ は節点 P_i の速度である。

葉がある場合とない場合とでは風が枝に与える力は大きく異なる。また、葉の質量が増えるため枝の揺れも変化する。現在本研究のモデルでは個々の葉の揺れは表現できないが、節点の質量 m_i 、表面積 s_i に葉の質量、表面積を追加しておくことで葉がある場合の枝の揺れを表現することは可能である。

・重力 節点 P_i にかかる重力を F_{grv} とすると、

$$F_{\text{grv}} = m_i g \quad (3.6)$$

となる。ここで、 g は重力加速度ベクトルである。

方向のずれ

外力による運動の結果、親の節点 P_i から見て子の節点 P_j の方向が、基準方向 (3.3.2 節で解説) からずれている場合、ずれを元に戻そうとする方向に復元力が働く (図 3.4)。

文献 [14] では親から子を見た場合だけでなく、子から親を見た場合に対しても復元力の計算を行っていたが、その方法では樹形が崩れるような方向に力が加わる場合がある (図 3.5)。

現実の樹木では枝先より枝の根本や幹が大きく動くことはほとんどないので、本研究では親から子を見た場合のみ復元力を与えることにし、子から親を見た場合の復元力は無視することにした。

時刻 t における親の節点 P_i から見た子の節点 P_j の方向を r_{ij} 、基準方向ベクトルを $b(t)$ とする ($|b(t)| = 1$)。節点 P_i から見て方向が $b(t)$ で距離が l_j の位置を $p(t)$ とす

枝の節点に働く復元力の反作用による力

樹木の枝先へのみ力が加わると、節点 \$P_i\$ へは反作用力が伝達されて枝先だけでなくより基部に近い節点にも力を与えることになる。しかし、節点 \$P_i\$ が力を受けた瞬間、その先の節点にも力が伝達される処理が必要となるため、力の計算に \$O(n^2)\$ のコストがかかることになる。この処理を行わずとも節点位置の変化により単位時間後には力が伝わり、力の伝達を考慮しなくても時間遅れのためにタイムステップをかなり短くしなければ樹形が壊れる可能性がある(図 3.5)。

文献[14]では力の伝達を考慮していなかったが、やはりタイムステップを変更していたが、やはりタイムステップを短くすれば、節点 \$P_i\$ に働く復元力に与えることにより、節点 \$P_i\$ が力を受けた瞬間、その先の節点にも力が伝達される処理が必要となるため、力の計算に \$O(n^2)\$ のコストがかかることになる。

復元力の反作用による力は以下の式に表される。

1. 枝の節点から木の根元までの節点位置は、木の根元から節点 \$P_i\$ までの節点位置に保たれる。
2. 節点 \$P_i\$ と枝の端点がベクトルで表される。節点 \$P_i\$ に働く復元力 \$F_{dir}\$ は、節点 \$P_i\$ から節点 \$P_j\$ までの節点位置に保たれる。

ると、

$$p(t) = P_i(t) + l_j b(t) \tag{3.7}$$

となる。 \$p(t)\$ は節点 \$P_i\$ から見た節点 \$P_j\$ の存在すべき位置であり、節点 \$P_j\$ には \$p(t)\$ に向かう方向へ力が働く。節点 \$P_j\$ に働く方向のずれによる復元力を \$F_{dir}(t)\$ とすると、

$$F_{dir}(t) = K_{dir} \frac{\pi d_i^2}{l_j} \{p(t) - P_j(t)\} \tag{3.8}$$

となる。ここで \$K_{dir}\$ は復元力の比例係数であるが、柳のように幹が硬く、枝先は軟らかい樹木を表現するために、枝先と幹で値を変更できるようにした。

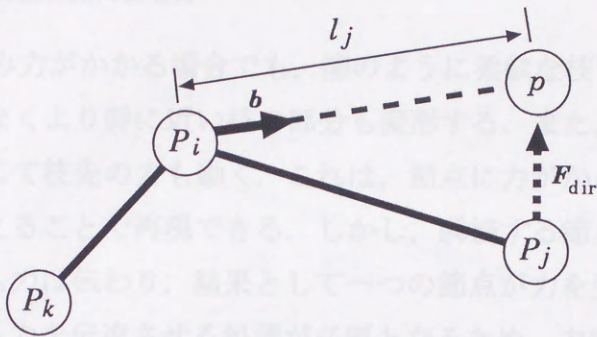


図 3.4: 方向のずれによる復元力

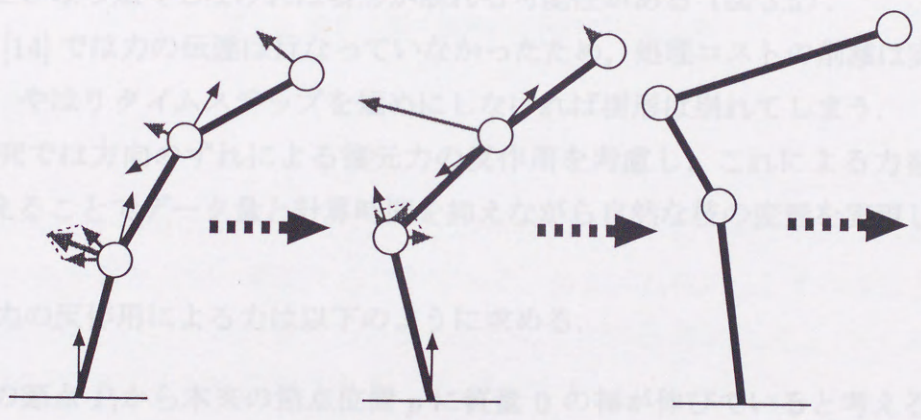


図 3.5: 樹形の崩壊

親の節点に働く復元力の反作用による力

樹木の枝先にのみ力がかかる場合でも、柳のように柔軟な枝でなければ力が伝達されて枝先だけでなくより幹に近い枝の部分も変形する。また、より幹に近い枝が動けば、それに応じて枝先の方も動く。これは、節点に力がかかった場合に隣接する節点にも力を与えることで再現できる。しかし、隣接する節点が力を受けると当然その先の節点にも力は伝わり、結果として一つの節点で力を受けると樹木を構成する全ての節点にも力を伝達させる処理が必要となるため、力の計算に $O(n^2)$ のコストがかかることになる。この処理を行わなくても節点位置の変化により単位時間後には力が伝わり、力の計算は $O(n)$ で済む。しかし時間遅れのためにタイムステップをかなり短くしなければ樹形が崩れる可能性がある (図 3.5)。

文献 [14] では力の伝達は行なっていなかったため、処理コストの削減は実現していたが、やはりタイムステップを短めにしなければ樹形は崩れてしまう。

本研究では方向のずれによる復元力の反作用を考慮し、これによる力を親の節点に与えることでデータ量と計算時間を抑えながら自然な枝の変形を実現した (図 3.6)。

復元力の反作用による力は以下のように求める。

1. 親の節点 P_i から本来の節点位置 p に質量 0 の棒が伸びていると考える。当然棒の端点の位置は本来の節点位置 p に保たれる。
2. 節点 P_j と棒の端点がバネでつながれていると仮定すれば、節点 P_j に働く復元力の反作用による力 $-\mathbf{F}_{\text{dir}}$ が棒の端点に働くと考えられる。
3. P_k が固定されていると仮定すると、 $-\mathbf{F}_{\text{dir}}$ によって棒および P_i にモーメント M_i が与えられると考えられる。このモーメント M_i は、

$$M_i = -\mathbf{F}_{\text{dir}} l_{kj} \cos \phi \quad (3.9)$$

で求められる。

4. P_i から p に伸ばした棒は仮に想定したものであり、実際には存在しないので、 P_i に力を与えることで M_i を実現させる。 P_i に与える力を \mathbf{F}_{rev} とすると、 \mathbf{F}_{rev} の

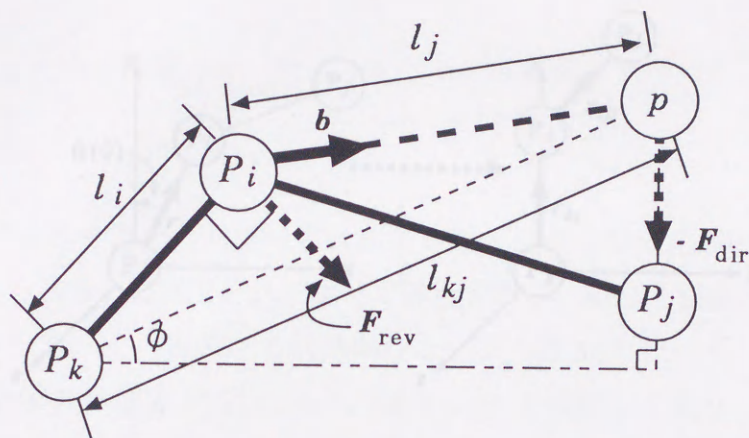


図 3.6: 親枝に働く復元力の反作用による力

大きさは

$$|\mathbf{F}_{\text{rev}}| = \frac{l_{kj} \cos \phi}{l_i} |\mathbf{F}_{\text{dir}}| \quad (3.10)$$

となり、その方向は P_k から P_i を見た方向および $-\mathbf{F}_{\text{dir}}$ と同一平面上にあり、 P_k から P_i を見た方向に直交する方向である。但し、 P_i に \mathbf{F}_{rev} をそのまま与えると樹木全体のバランスを崩すことがあるため、力の伝達係数 K_{rev} ($0 \leq K_{\text{rev}} \leq 1$) を用いて与える力を調節できるようにした。

基準方向の計算

方向のずれを検出する際に使用する基準方向は、節点の本来あるべき方向を示すもので、この方向を基準ベクトルとして、初期状態での節点間の相対的な位置関係から求める。

・相対方向の計算 親の節点 P_i から見た子の節点 P_j の相対関係を求めるには、さらに P_i の親の節点 P_k を合わせて考える必要がある。まず、初期状態での節点間の相対的な位置関係の計算法を以下のようにして求める (図 3.7)。

1. P_k から P_i に向かう長さ 1 のベクトルを \mathbf{r}_{ki} とする。
2. $\mathbf{r}_{ki}(0)$ を y 軸方向に回転させ、それに合わせて $P_i(0)$ と $P_j(0)$ も回転させる。

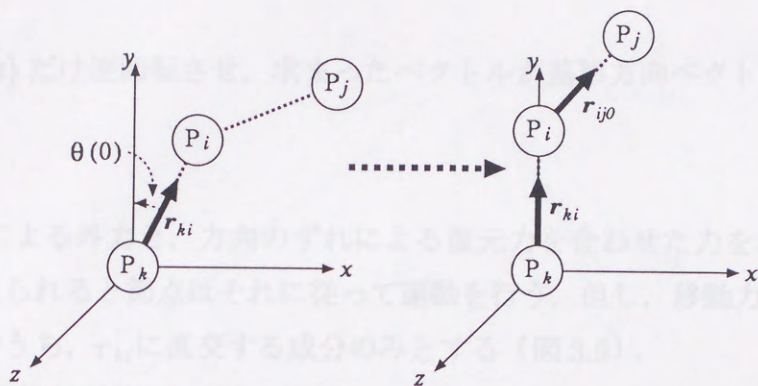


図 3.7: 相対方向の計算

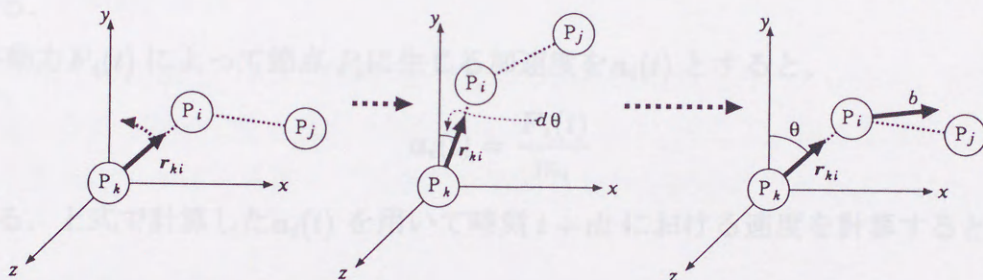


図 3.8: 基準方向の計算

3. $r_{ki}(0)$ を y 軸方向に向ける回転量を $\theta(0)$, 回転後の $P_i(0)$ から $P_j(0)$ に向かうベクトルを

r_{ij0} とし, これを相対方向として記憶する.

・基準方向の計算 上で求めた相対方向と時刻 t における節点間の関係から基準方向を以下のように求める (図 3.8).

1. $P_k(t)$ から $P_i(t)$ に向かう長さ 1 のベクトル $r_{ki}(t)$ を $\theta(0)$ だけ回転させ, 回転後の $r_{ki}(t)$ を y 軸方向に向ける回転量を $d\theta(t)$ とする.

2. 基準方向から r_{ij0} の方向に向けるための回転量を $\theta(t)$ とすると,

$$\theta(t) = \theta(0) + d\theta(t) \quad (3.11)$$

となる。

3. r_{ij0} を $\theta(t)$ だけ逆回転させ、求まったベクトルが基準方向ベクトル $\mathbf{b}(t)$ となる。

節点の運動

風、重力による外力と、方向のずれによる復元力を合わせた力を移動力とよぶ。移動力が与えられると節点はそれに従って運動を行う。但し、移動力 \mathbf{F}_i は外力、復元力の合力のうち、 \mathbf{r}_{ki} に直交する成分のみとする（図 3.9）。

時刻 t に節点 P_i が位置 $P_i(t)$ にあり、速度 $\mathbf{v}_i(t)$ で運動しており、節点 P_i に対して移動力 $\mathbf{F}_i(t)$ が与えられたとする。このとき、時刻 $t + dt$ における節点 P_i の位置 $P_i(t + dt)$ と速度 $\mathbf{v}_i(t + dt)$ を求める。ここで、 dt は 1 タイムステップの間隔であるとする。

移動力 $\mathbf{F}_i(t)$ によって節点 P_i に生じる加速度を $\mathbf{a}_i(t)$ とすると、

$$\mathbf{a}_i(t) = \frac{\mathbf{F}_i(t)}{m_i} \quad (3.12)$$

である。上式で計算した $\mathbf{a}_i(t)$ を用いて時刻 $t + dt$ における速度を計算すると、

$$\mathbf{v}_i(t + dt) = K_{\text{vdel}} \mathbf{v}_i(t) + \mathbf{a}_i(t) dt. \quad (3.13)$$

ここで、 K_{vdel} は樹木の抵抗による速度の減衰率である。さらに、時刻 $t + dt$ における節点の位置を計算すると、

$$P_i(t + dt) = P_i(t) + \mathbf{v}_i(t + dt) dt \quad (3.14)$$

となる。

距離のずれの修正

節点の運動により、時刻 $t + dt$ における親の節点 P_i と子の節点 P_j との距離 $l_j(t + dt)$ は初期状態における距離 $l_j(0)$ から変化する。それを元に戻すため、節点 P_j を図 3.10 のように節点 P_i から距離 $l_j(0)$ の位置に修正する。

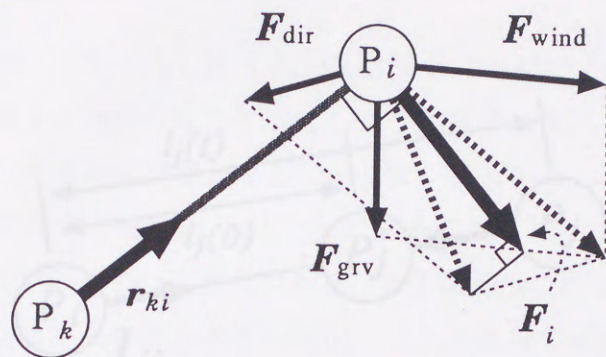


図 3.9: 節点に働く移動力

3.3.3 節点間の補間

本手法では高速化のため運動計算のための節点数削減を行っているが、削減した節点をそのまま表示すると枝が直線的になってしまう。そこで、樹木を表示する際に節点と節点の間の節を考慮して節点間を補間しながら表示ができるようにした (図 3.11)。

補間の計算は以下のように行う。

1. データ入力時に、節点 P_i, P_j 間の節 P_{i_n} ($1 \leq n \leq$ 節点 P_i, P_j 間の節数) の初期位置 $P_{i_n}(0)$ を記憶しておく。
2. 節点の運動の計算後、時刻 t における節点 P_i の位置 $P_i(t)$ からみた節点 P_j および節 P_{i_n} の相対的初期位置を求めるため、節点 P_i の移動にあわせて、 P_k を中心として P_j, P_{i_n} を回転移動させ、その位置をそれぞれ P'_j, P'_{j_n} とする。
3. 節点 P_j に力が掛かり、相対的初期位置 P'_j から $P_j(t)$ に移動した場合、その中間の節の位置は

$$P_{j_n}(t) = P'_{j_n} + \left(\frac{l_{j_n}}{l_j} \right)^\alpha M_j \quad (3.15)$$

($1 \leq n \leq$ 節点 P_i, P_j 間の節数, $\alpha = 2$)

となる。 α は 1 以上で、1 なら枝は P_i で折れ曲がった形になる。本稿では $\alpha = 2$ とした。

3.4 枝の揺れの運動計算の省略

樹木の揺れを観察してみると、幹や太い枝はほとんど揺れず、また枝先の細い枝でもごく短い枝の場合は親枝の揺れに追従して揺れない場合が多い。そのような枝は親枝の揺れに追従して揺れない枝でも、他の枝より揺れ力を大きくすることで、揺れを抑制する。この方法ではこれを逆にも利用し、揺れを抑制してしまえば、揺れを抑制する枝の揺れを計算する必要がなくなる。先に親枝との位置関係を保持しておくことで枝の異常な揺れの防止と処置の軽減を両立している。

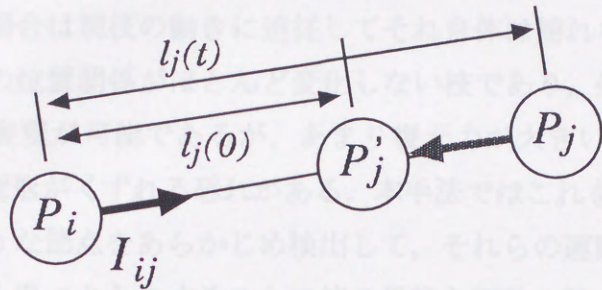


図 3.10: 距離のずれの修正

3.4.1 揺れの計算を行わない枝を決定

計算のため、1次元で考える。節点 P_i は原点にあって、 j 枝方向のみに動くとする。

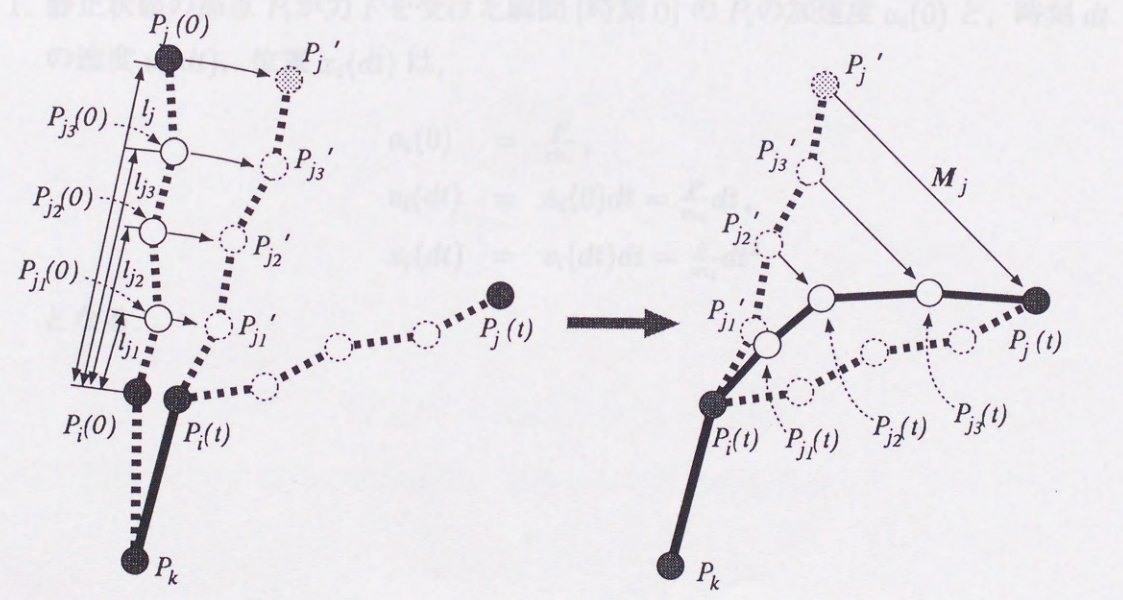


図 3.11: 節点間の補間

3.4 枝の揺れの運動計算の省略

樹木の揺れを観察してみると、幹や太い枝はほとんど揺れず、また枝先の細い枝でもごく短い枝の場合は親枝の動きに追従してそれ自体は揺れない場合が多い。そのような枝は親との位置関係がほとんど変化しない枝であり、他の枝より復元力を大きくすることで表現が可能であるが、あまり復元力が大きいと節点位置が振動、発散してしまい、樹形がくずれる恐れがある。本手法ではこれを逆に利用し、振動、発散してしまいそうな節点をあらかじめ検出して、それらの運動計算を省略し、常に親との位置関係を保つようにすることで枝の異常な振動の防止と処理の軽減を両立している。

ここでは運動計算を省略する節点の検出、設定方法について説明する。

3.4.1 揺れの計算を行わない枝を決定

簡単のため、1次元で考える。節点 P_i は原点にあつて、 x 軸方向のみに動くとする。

1. 静止状態の節点 P_i が力 F を受けた瞬間 (時刻 0) の P_i の加速度 $a_i(0)$ と、時刻 dt の速度 $v_i(dt)$ 、位置 $x_i(dt)$ は、

$$\begin{aligned} a_i(0) &= \frac{F}{m_i}, \\ v_i(dt) &= a_i(0)dt = \frac{F}{m_i}dt, \\ x_i(dt) &= v_i(dt)dt = \frac{F}{m_i}dt^2 \end{aligned}$$

となる。

2. 節点 P_i には x_i に比例した復元力 $K_x x_i$ が働くので、時刻 dt の加速度と時刻 $2dt$ の速度、位置は、

$$\begin{aligned}
 a_i(dt) &= \frac{F - K_x x_i(dt)}{m_i} \\
 &= \frac{F - K_x \frac{F}{m_i} dt^2}{m_i}, \\
 v_i(2dt) &= v_i(dt) + a_i(dt)dt \\
 &= \frac{F}{m_i} dt + \frac{F - K_x \frac{F}{m_i} dt^2}{m_i} dt \\
 &= \frac{2F - K_x \frac{F}{m_i} dt^2}{m_i} dt, \\
 x_i(2dt) &= x_i(dt) + v_i(2dt)dt \\
 &= \frac{F}{m_i} dt^2 + \frac{2F - K_x \frac{F}{m_i} dt^2}{m_i} dt^2 \\
 &= \frac{3F - K_x \frac{F}{m_i} dt^2}{m_i} dt^2
 \end{aligned}$$

となる。

3. 復元力が大きすぎて節点位置が振動、発散しないためには、 $x_i(2dt) \geq 0$ である必要がある。この条件と前の式から、

$$\begin{aligned}
 \frac{3F - K_x \frac{F}{m_i} dt^2}{m_i} dt^2 &\geq 0, \\
 3 - K_x \frac{1}{m_i} dt^2 &\geq 0, \\
 K_x \frac{1}{m_i} dt^2 &\leq 3, \\
 K_x &\leq \frac{3m_i}{dt^2}
 \end{aligned}$$

となる。

4. 実際の復元力は、

$$\mathbf{F}_{\text{dir}}(t) = K_{\text{dir}} \frac{\pi d_i^2}{l_j} \{p(t) - P_j(t)\}$$

で求めるので、節点位置が振動、発散しないための条件は、

$$K_{\text{dir}} \frac{\pi d_i^2}{l_j} \leq \frac{3m_i}{dt^2}$$

である。これを利用して、節点 P_i の復元力の係数が、

$$K_{\text{dir}} \frac{\pi d_i^2}{l_j} > \frac{3m_i}{dt^2} \tag{3.16}$$

のとき、節点 P_i は運動の計算を行わないものとする。

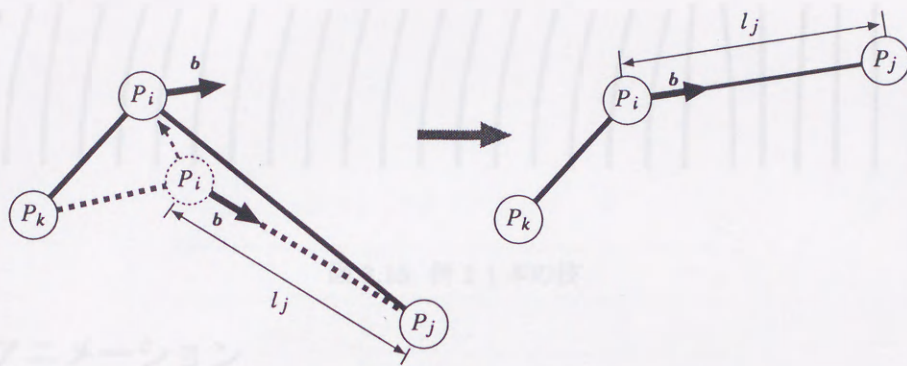


図 3.12: 親の節点に追従する節点の座標計算

3.4.2 動かない節点と親枝に追従する節点の決定

運動計算をしない節点は、太い幹のように動かない節点と、短くてほとんど曲がらない枝のように親枝に追従する節点とに分けられる。これは次のように決定する。

- 運動の計算を行わない節点 P_i の親の節点 P_k が図 3.2 のデータ構造における根であるとき、節点 P_i は動かない節点とする。
- 運動の計算を行わない節点 P_i の親の節点 P_k が動かない節点のとき、節点 P_i も動かない節点とする。
- 節点 P_i の親の節点 P_k が動く節点のとき、節点 P_i は親の節点 P_k の動きに追従する。

3.4.3 親の節点に追従する節点の計算方法

親の節点 P_k に追従する節点 P_i の位置は、方向のずれの計算で行う基準方向の計算を行って、節点 P_i の位置を親の節点 P_k から見た本来の位置につねに更新することで求められる (図 3.12)。

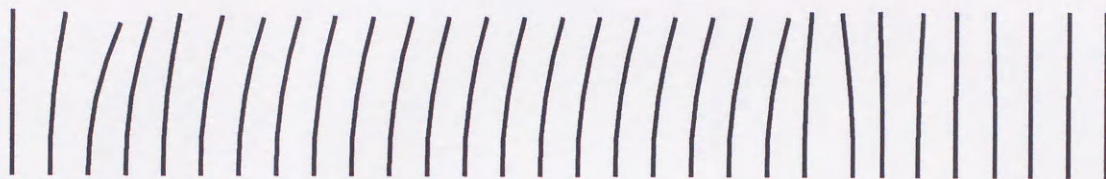


図 3.13: 例 1 本の枝

3.5 アニメーション

以上の方法を用いたプログラムを作成し、樹木のアニメーション表示を試みた。風は左から右に、無風の状態から突然一定の速度で吹き初め、突然無風状態に戻るという条件で与えた。使用したパラメータやデータを表 3.1 に示す。使用計算機は SUN SPARC classic, 3次元ライブラリには PEX を使用した。リアルタイムでの表示はできなかったが、画面上で動きの確認をすることは十分可能であった。

3.5.1 1本の枝のみの例

まず、1本の枝のみの実行例を図 3.13 に示す。風速は 5メートル、図の時間間隔は 0.1秒である。風を受けると枝は大きく曲がるが反動で少し戻り、しばらくして安定する。風が止むと今まで力を受けていた反動で反対側に曲がり、少し振動して元の状態に戻ることが確認できる。

この例に関して、すべての節を節点として運動を計算した場合と先端の節のみを節点として運動を計算した場合の処理速度を比較したところ、表示などを除く運動計算の処理のみでは、節の補間なしで約 3.9倍、補間ありでは約 2.1倍の高速化が実現できた。

3.5.2 枝の広がった樹形を対象とした例

次に、より現実の樹木に近い、枝の広がった樹形を対象とした例を図 3.14 に示す。図の時間間隔は 0.2秒、風速は 3.5.1節と同様である。

図 3.14の上段は風の吹き初め、下段は風の吹き終りである。やはり風を受けた時は枝が右に曲がり、多少振動してから安定しており、風が止んだ時は反動で左に曲

表 3.1: パラメータとデータ

	例 1	例 2~4	例 5
K_{wind}	0.1	0.1	0.1
K_{dir}	50000	50000 ~ 150000	90000 ~ 700000
K_{rev}	0	0.8	0.7
K_{vdel}	0.9	1	1
δ	0.12	0.12	0.12
m_{leaf}	0g	3g	5g
s	0cm ²	30cm ²	20cm ²
dt	1/30 秒	1/30 秒	1/30 秒
風速	5m/s	5,20m/s	10m/s
全節数	5	543	319
節点数	1	70	45
運動節点数 (() は葉あり)	1	27 (48)	19
追従節点数 (() は葉あり)	0	43 (22)	26
表示速度 (補間なし)	約 17fps	約 11fps	約 13fps
表示速度 (補間あり)	約 16fps	約 5fps	約 8fps

図 3.16: 例 4 枝の定めた節数 (葉のある場合)



図 3.14: 例 2 枝の広がった樹形

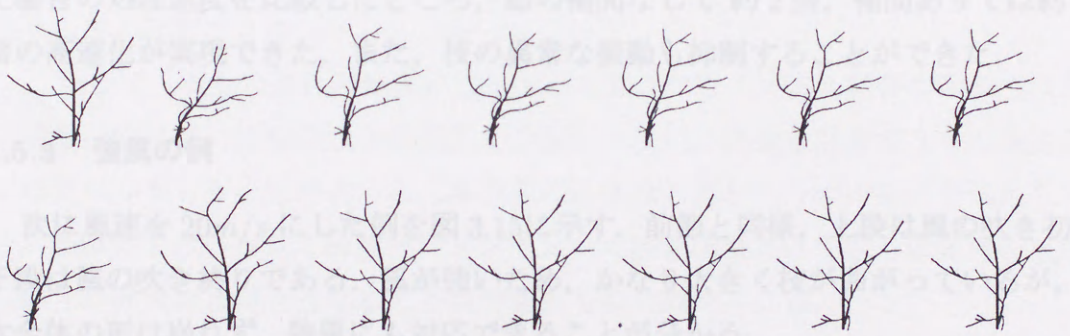


図 3.15: 例 3 枝の広がった樹形 (強風)

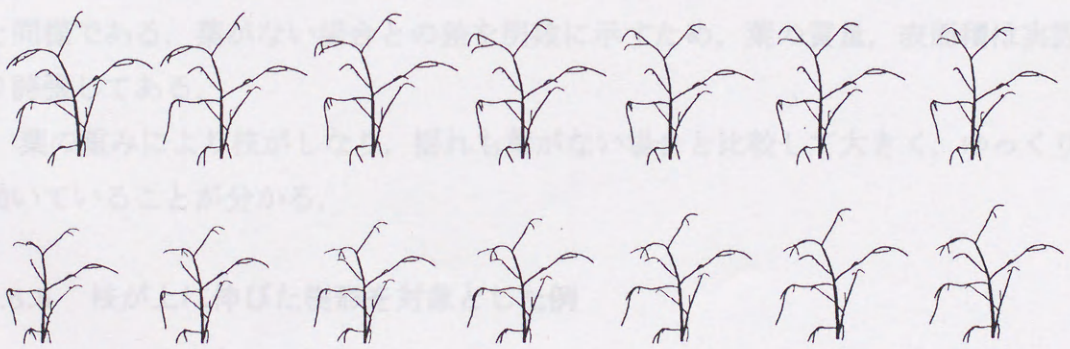


図 3.16: 例 4 枝の広がった樹形 (葉のある場合)



図 3.17: 例 5 枝が上に伸びた樹形

がり、少し振動した後元の状態に戻ることが分かる。

この例に関して、全節点の運動計算を行った場合と節点の運動計算の省略を行った場合の処理速度を比較したところ、節の補間なしで約 2 倍、補間ありでは約 1.7 倍の高速化が実現できた。また、枝の異常な振動も抑制することができた。

3.5.3 強風の例

次に風速を 20m/s にした例を図 3.15 に示す。前節と同様、上段は風の吹き初め、下段は風の吹き終りである。風が強いため、かなり大きく枝が曲がっているが、樹木全体の形は崩れず、強風にも対応できることが分かる。

3.5.4 葉がある場合の例

葉がある場合の質量、表面積を考慮した例を図 3.16 に示す。樹形は前節、前々節と同様である。葉がない場合との差を明確に示すため、葉の質量、表面積は実際より誇張してある。

葉の重みにより枝がしなり、揺れも葉がない場合と比較して大きく、ゆっくりと動いていることが分かる。

3.5.5 枝が上に伸びた樹形を対象とした例

多様な樹種に対応できることを示すため、枝が上に伸びた樹形を揺らせた例を図 3.17 に示す。

例 2~4 とは全く異なる樹形で、揺れ方も例 2 とは違い、あまり振動しない。この差異は樹種の違いによるものもあると思われるが、パラメータの設定が関係している可能性もある。

3.6 まとめ

本章では、樹木の揺れる様子をアニメーションで表現するための手法を提案した。まず、入力された樹木データに応じて樹木を質量を持った節点とその隣接関係で表現し、各節点に働く力と、それによる運動の計算を行うことで樹木の揺れの表現が可能であることを確認した。また、データ量削減と高速化のために節点数の制限や節点の運動計算の省略を行っても、元の樹形を損なわずにアニメーションが可能であることも確認できた。

これまで、樹木の揺れの表現についての研究は少なく、また既存の手法では多様な樹形への対応、任意の強さの風による揺れの表現、高速な計算の3つの条件のいずれに対しても不十分であった。本研究の手法はこれらの3つの条件を満たしており、自然景観のCGシミュレーションにおいて静止画像だけでなく動画像を生成する場合に現実感を向上させることができるものと期待される。

しかし、樹木のような複雑な構造物はデータ量が非常に多いため、レンダリングを行う場合には1本の樹木を表現する場合でも数万から数十万ポリゴンを必要とすることもある。そのため、遠景の樹木が存在する景観の画像を長時間で生成することは非常に困難である。

樹木画像を高速に生成する手法としては、単純な形状のポリゴンに樹木の質感をテクスチャマッピングする手法があり[16]、樹木画像を得る簡便な手法としてよく用いられている。しかし、この手法は樹木の形状データを持たないため、風による揺らぎ[14, 12]などの樹木の姿勢を表現することができない。

また、樹木をフラクタル図形とみなして形状データを生成し、表示時に指定されたサイズより小さい枝をポリゴンで置き換えることで高速に樹木画像を生成する手法が提案されている[16]。しかしこの手法ではフラクタルモデルによって生成された樹木にしか対応できない。

そのほか、視点から樹木までの距離が遠い場合は枝を減分て、葉を点描で表示す

第 4 章

テクスチャマッピングと線分描画による 3 次元樹木画像の高速生成手法

4.1 はじめに

CGによる樹木画像の生成に関する研究は近年大きな発展を遂げている。樹形を生成する研究では、光、重力などの環境の影響を考慮したものや、植物ホルモンの作用をモデル化することで樹木のさまざまな性質を再現したものもあり、より現実の樹木に近い樹形が得られるようになってきた [4, 11]。

しかし、樹木のような複雑な構造物はデータ量が非常に多いため、レンダリングを行う場合には1本の樹木を表現する場合でも数万から数十万ポリゴンを必要とすることもある。そのため、複数の樹木が存在する景観の画像を実時間で生成することは非常に困難である。

樹木画像を高速に生成する手法としては、単純な形状のポリゴンに樹木の画像をテクスチャマッピングする手法があり [15]、樹木画像を得る簡便な手法としてよく用いられている。しかし、この手法は樹木の形状データを持たないため、風による揺らぎ [14, 12] などの樹木の変形を表現することができない。

また、樹木をフラクタル図形とみなして形状データを作成し、表示時に指定されたサイズより小さい枝をポリゴンで置き換えることで高速に樹木画像を生成する手法が提案されている [16]。しかしこの手法ではフラクタルモデルによって生成された樹木にしか対応できない。

そのほか、視点から樹木までの距離が遠い場合は枝を線分で、葉を点描で表示す

るという手法があり [8], この方法はテクスチャを用いないのでメモリの消費を抑えられる, 樹形に依存しない, といった利点があるが, 近景での表示ではデータ量が削減されないため表示に時間がかかる.

本章では, 視点からの距離に応じて, 樹木の細い枝を線分で, 幹や太い枝, 葉をテクスチャマッピングされた 1 枚のポリゴンで表現することでデータ量を大幅に削減しつつ, 任意の樹形に対応でき, 視点変更や樹木の変形に対応し, 高速に樹木画像を生成可能な樹木画像の生成手法を提案する.

以下, 4.2 節では樹木画像の生成手法を解説し, 4.3 節では本手法を用いて樹木画像を高速に生成可能であることを示す. 最後に, 4.4 節で本章のまとめを行う.

4.2 樹木画像の生成手法

本手法による樹木画像の生成は次のような手順で行われる.

1. 樹木データの入力
2. 各枝の描画方法を選択 (テクスチャ, 線分)
3. 樹木データからマッピング用テクスチャを作成
4. 視点に応じたテクスチャを表示
5. 枝の色, 太さを計算し, 線分を描画

樹木データとしては樹木データには 2 章の方法による出力結果を用いた. この方法による樹木データは図 3.2 のような構造をもち, 一世代で伸びた部分ごとに枝を管理しており, 本手法も同様に処理している. 以下, 「枝」はこの一世代で伸びた部分を指す.

4.2.1 描画方法の選択

本処理では, 入力された樹木データの各枝を線分で描画するか, テクスチャを用いるかを決定する.

まず, 枝 i の太さ d_i , 樹木を覆う球の半径 R , 画面上の縦, 横の画素数 H, W から, 画面に表示された時の枝 i の太さの画素数 D_i を次式で求める.

$$D_i = d_i \frac{\min(H, W)}{2R} \quad (4.1)$$

これはどの方向から見ても画面からはみ出さない最大の大きさで樹木を正射影した場合の枝の太さを求める式である。実際は透視法射影で表示を行うので枝の幅は式 4.1 とは多少異なるが、処理を簡単にするためにこの式を用いた。

D_i があらかじめ定められた画素数より大きければ枝 i はテクスチャを用い、小さければ線分で描画する。また、葉をもつ枝もテクスチャを用いて描画する。

4.2.2 テクスチャ生成

本処理ではテクスチャマッピングで描画する枝および葉で用いられるテクスチャを作成する。

まず枝 i に最も近づく平面に枝 i を正射影で投影し、枝 i の下端から上端に向かうベクトル b_i が上に向くようにテクスチャを作成する。テクスチャデータのうち、枝を示す部分以外は透明としておく。同時に、テクスチャマッピングを行うための長方形ポリゴンとその法線ベクトルを求める。ここで、本手法では1枚のテクスチャには1本の枝しか投影されていないので、良く似たテクスチャが多く作られると考えられる。そこで、長さ、太さ、節数、屈曲角がほぼ同じ枝ごとにグループ化し、グループ毎にテクスチャを作成することでデータ量が削減されるようにした。

つぎに、求めた法線ベクトル方向に視点を置いて、枝、および、葉がある場合は葉も同時に正射影で画像を作成し、テクスチャデータとしてその画像を取り込む。

1本の枝に対して複数のテクスチャを作成する場合は、ベクトル b_i を軸として平面を回転させ、同様にテクスチャの作成とポリゴンの計算を行う。任意の視点で樹木画像を作成するには図 4.1 のように、1本の枝に対して最低2枚のテクスチャが必要である。

4.2.3 テクスチャマッピングによる枝、葉の描画

本処理ではテクスチャマッピングによる枝の描画を行う。

前節で作成したテクスチャと長方形ポリゴンを用いて枝、葉を表示するが、求められたすべてのポリゴンを表示するのではなく、ポリゴンの法線ベクトルを視点に

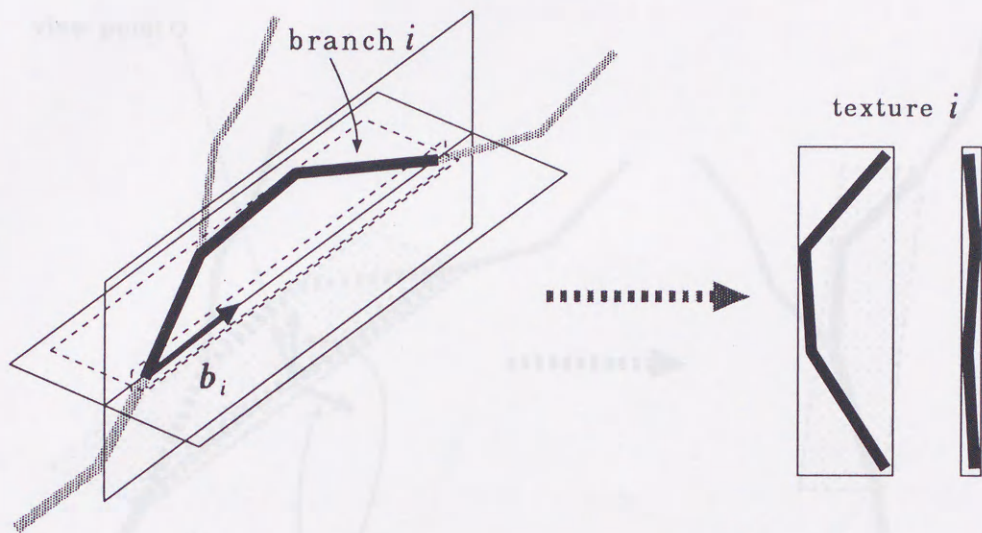


図 4.1: テクスチャ生成

向かうベクトルと比較し、最も視点方向に近い法線ベクトルを持つポリゴンのみを選択し、対応するテクスチャをマッピングして表示する (図 4.2)。また、同時に透過マッピングを行って、枝、葉以外の部分ではポリゴンの向こうを見通せるようにする。こうすることで1本の枝と葉を1枚のポリゴンのみで表示することができる。

4.2.4 線分の描画

本処理ではテクスチャで表示されない枝を線分で描画する。

枝を線分で描画する場合、あらかじめその色、幅を求める必要がある。枝の幅は式 4.1を用いる。但し、拡大、縮小表示を行う場合は、式 4.1の結果に拡大、縮小率を掛けた値で線分を描画する。

枝の色は拡散反射光と環境光の成分のみを考慮して求める。Lambert の余弦則によれば、拡散反射光は面法線と光源のベクトルの内積によって求められる。枝 i の平均的方向は枝 i の下端から上端に向かうベクトル b_i であるとすれば、枝の表面の法線ベクトルはベクトル b_i と直交していると考えられる。ここで、枝表面の色のうち最も明るい色を表示する枝の色とすると、

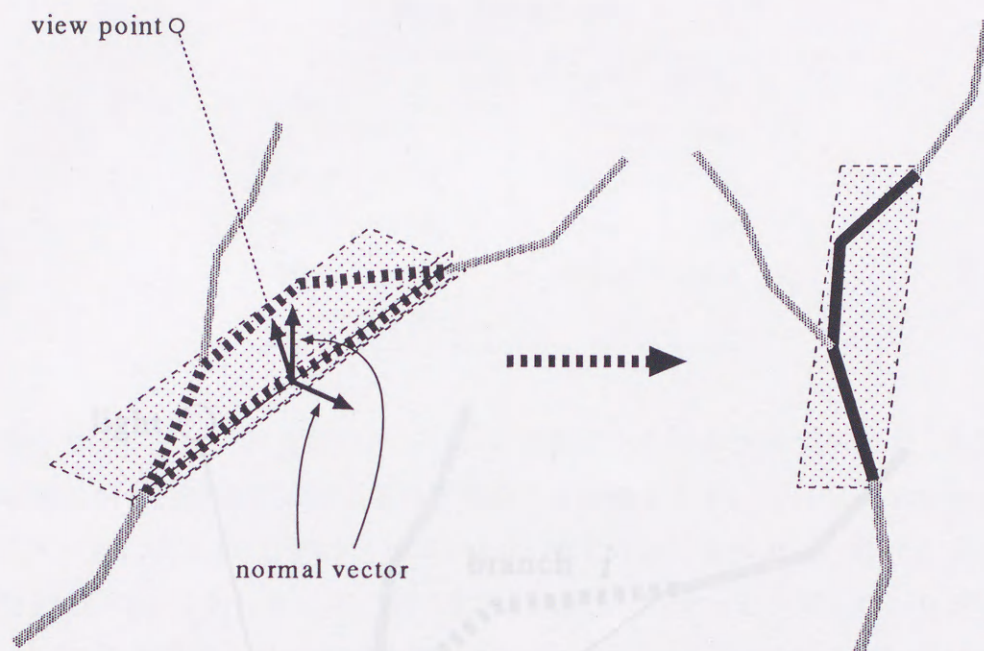


図 4.2: テクスチャマッピングによる枝の描画

$$C_i = C_b(k_d C_L |\mathbf{b}_i| |\mathbf{L}_i| \sin\theta + k_a) \quad (4.2)$$

で求められる (図 4.3). ここで, C_b は枝の物体色, C_L は光源色, \mathbf{L}_i は枝 i の位置から見た光源の方向を示すベクトル, θ はベクトル \mathbf{b}_i と \mathbf{L}_i のなす角, k_d は拡散光係数, k_a は環境光係数である.

以上のように, 求められた色と幅で線分を描画することで樹木の枝を表現することができる.

4.3 結果

本研究の手法を確認するためにプログラムを作成し, 樹木画像の生成を行った. 3次元グラフィックライブラリには OpenGL 互換の Mesa を用い, 計算機は Sun Sparc Classic を使用した.

図 4.4 はすべての枝をポリゴンで表示した例, 図 4.5 は本手法による例である.

表 4.1: 本手法の効果

	ポリゴン表示	本手法
線分数	— 0	2056
枝のポリゴン数	— 23643	18
葉のポリゴン数	— 1485	206
葉ポリゴン数	— 24131	214
テクスチャ数	— 0	27

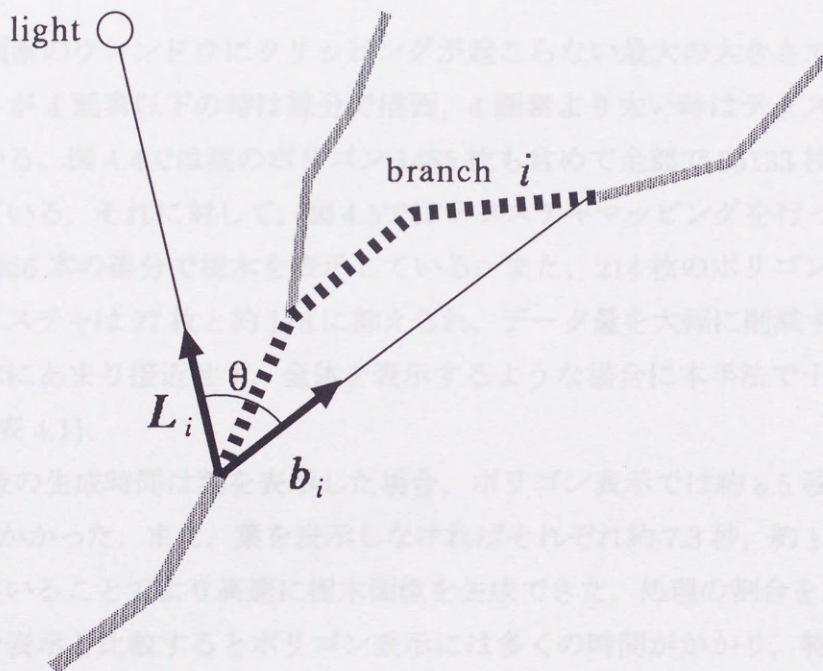


図 4.3: 線分描画による枝の色計算

4.4 まとめ

本章では、樹木画像を高速に生成する手法を提案した。樹木の緑い枝を線分で、幹や太い枝、葉をテクスチャマッピングされた1枚のポリゴンで表現することで、樹木全体の印象を損なわずにデータ量を削減し、高速に樹木画像を生成することが可能であることを確認した。

本章では2章の方法によるデータを用いているが、本手法はフラクタル等の性質

表 4.1: 本手法の効果

	ポリゴン表示	本手法
線分数	0	3956
枝のポリゴン数	33648	18
葉のポリゴン数	1485	196
総ポリゴン数	35133	214
テクスチャ数	0	27

512×512画素のウィンドウにクリッピングが起こらない最大の大きさで、画面上での枝の太さが4画素以下の時は線分で描画、4画素より太い時はテクスチャで枝を表示している。図4.4では葉のポリゴン1485枚も含めて全部で35133枚のポリゴンを使用している。それに対して、図4.5ではテクスチャマッピングを行ったポリゴン214枚と3956本の線分で樹木を表示している。また、214枚のポリゴンにマッピングするテクスチャは27枚と約1/8に抑えられ、データ量を大幅に削減することができた。樹木にあまり接近せず、全体を表示するような場合に本手法で十分な効果が得られた(表4.1)。

樹木画像の生成時間は葉を表示した場合、ポリゴン表示では約8.5秒、本手法では約4.2秒かかった。また、葉を表示しなければそれぞれ約7.3秒、約1.2秒となり、本手法を用いることでより高速に樹木画像を生成できた。処理の割合を比較すると、やはり線分表示と比較するとポリゴン表示には多くの時間がかかり、特に葉を表示した場合は表示しない場合と比較してより時間がかかっている(表4.2)。

4.4 まとめ

本章では、樹木画像を高速に生成する手法を提案した。樹木の細い枝を線分で、幹や太い枝、葉をテクスチャマッピングされた1枚のポリゴンで表現することで、樹木全体の印象を損なわずにデータ量を削減し、高速に樹木画像を生成することが可能であることを確認した。

本章では2章の方法によるデータを用いているが、本手法はフラクタル等の性質

表 4.2: 画像生成時間と処理の割合

処理内容	全てポリゴンで表示		本手法	
	葉あり	葉なし	葉あり	葉なし
ポリゴン表示	98%	97%	83%	25%
線分表示	0%	0%	12%	58%
その他	2%	2%	5%	17%
画像生成時間	約 8.5 秒	約 7.3 秒	約 4.2 秒	約 1.2 秒

は利用していないので任意の樹形に対応可能である。また、樹木の形状データを保持しているため、風による揺らぎなど、樹木の変形を表現することも可能である。

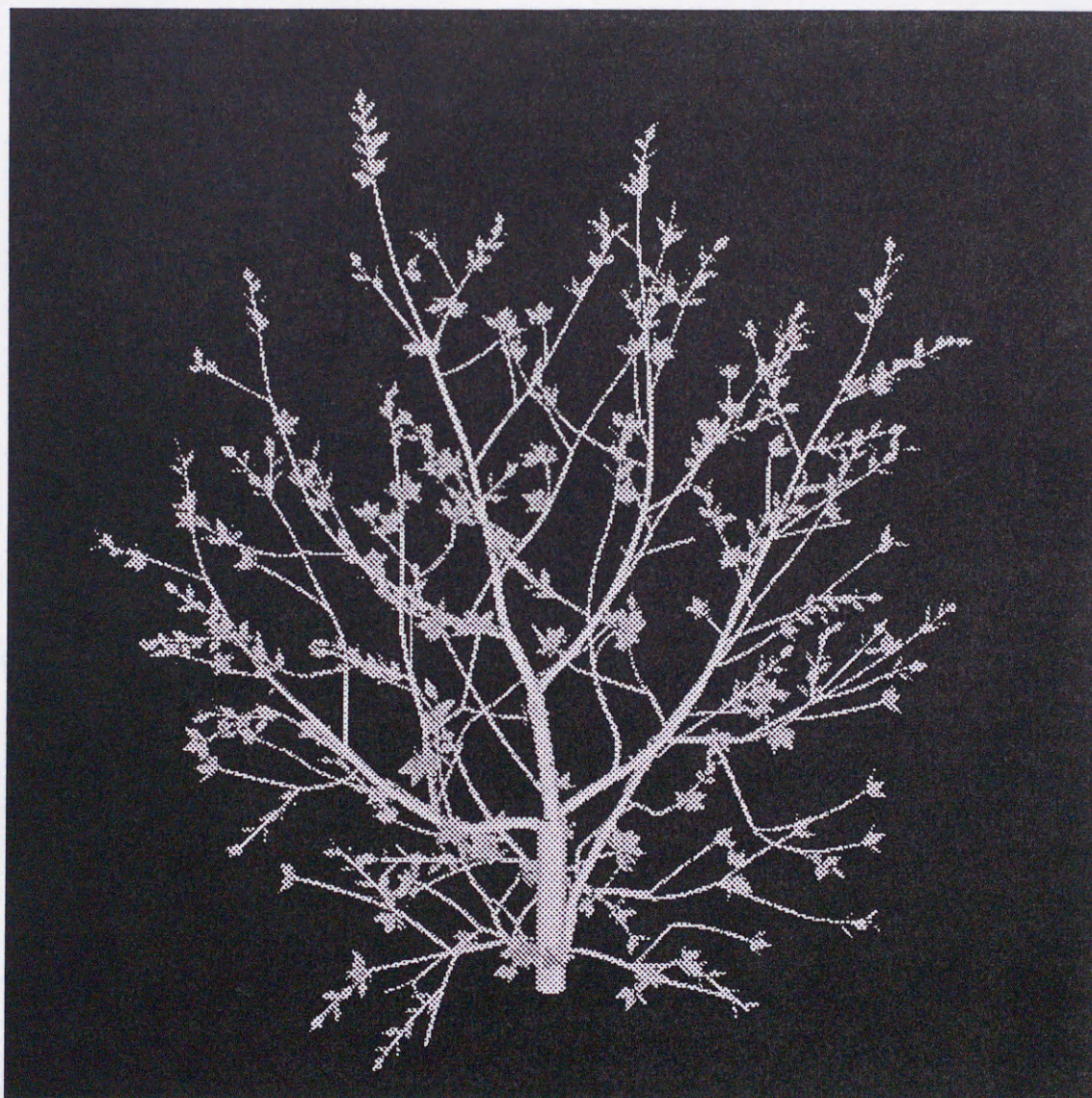


図 4.4: ポリゴン表示による樹木画像

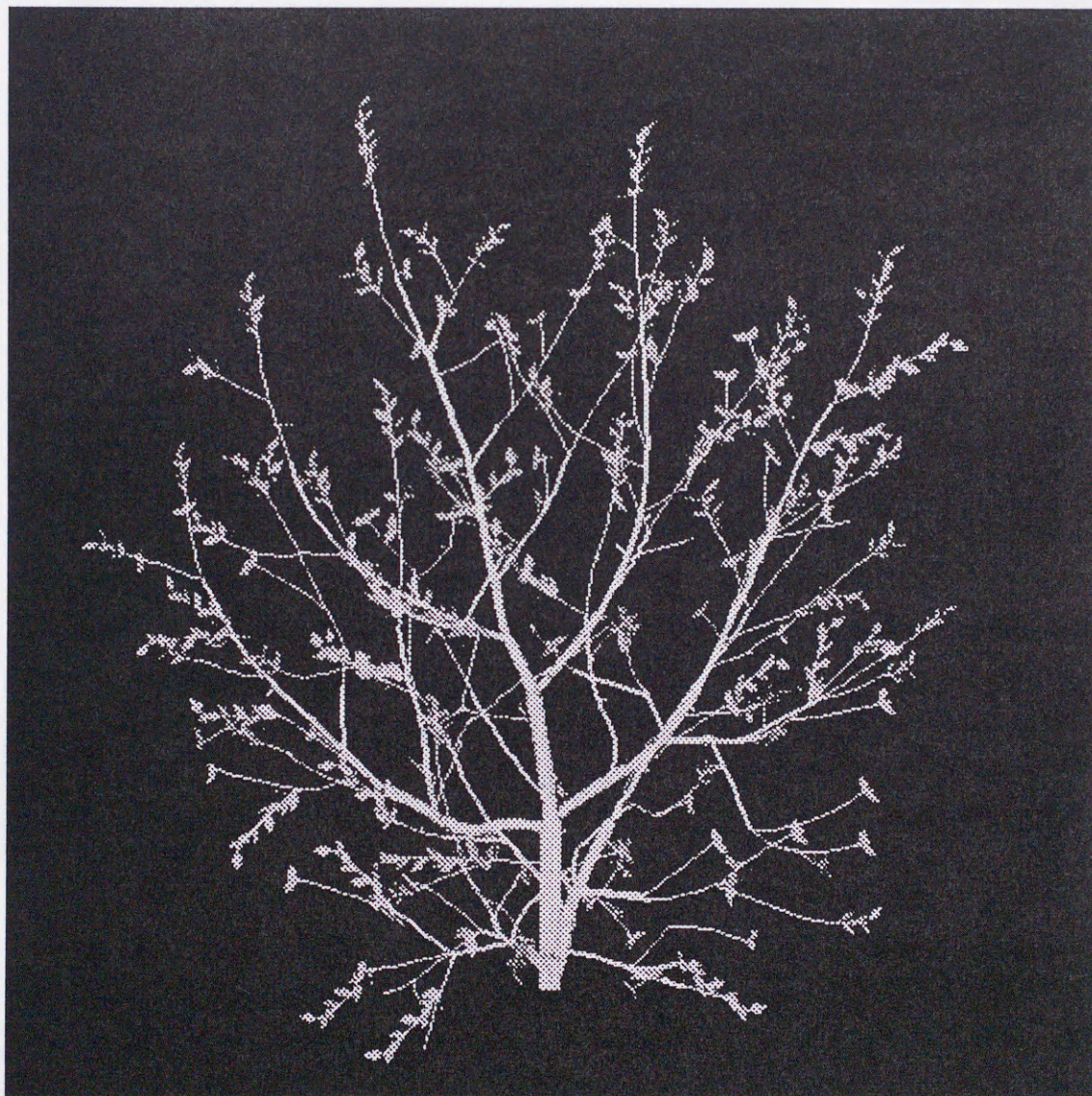


図 4.5: 本手法による樹木画像

第 5 章

結 論

5.1 まとめ

本論文では CG の分野で今後重要になるとと思われる自然物、自然現象の CG 表現の中で、様々な応用の考えられる樹木の画像生成に関する研究のうち、最も重要な樹木の形状データ作成、動画像生成に必要な樹木の揺れの表現、樹木画像の高速表示を取り上げ、検討を行なった。これらは互いに独立した問題であるが、それぞれの手法を組み合わせることもできる。単体の樹木の画像生成に必要な手法はこれら 3 つでほぼ揃ったといえる。

本論文の第 2 章では、樹木の形状データ作成方法として、ただ形を真似るだけでなく、現実の樹木の生長をシミュレートすることも目指し、様々な樹種をリアルに生成できる樹木の生長モデルを作成して、樹木の性質の再現と、現実の樹木の生長シミュレーションを行なった。その結果、この生長モデルで頂芽優勢、休眠芽の休眠打破、枝の短枝化、屈光性、屈地性といった、樹木の性質の再現が可能であることを確認し、また、現実に存在する、様々な異なった樹種がパラメータを調整するだけで生成可能であることを確認した。

第 3 章では、樹木の揺れる様子をアニメーションで表現するための手法を考案した。入力された樹木データに応じて樹木を質量を持った節点とその隣接関係で表現し、各節点に働く力と、それによる運動の計算を行うことで樹木の揺れの表現が可能であることを確認した。また、データ量削減と高速化のために節点数の制限や節点の運動計算の省略を行っても見た目の自然さを損なわずにアニメーションが可能

であることも確認できた。

第4章では、任意の樹形に対応できることと、樹木の揺れを表現することを可能とするため、入力された樹木の形状データをそのまま保持し、樹木の細い枝を線分で、幹や太い枝、葉をテクスチャマッピングされた1枚のポリゴンで表現する樹木画像の高速生成手法を提案した。この手法を用いることで、データ量を削減し、通常のポリゴン表示とほぼ同等な品質の樹木画像を高速に生成することが可能であることを確認した。

計算機的能力向上とCG技術の発達により、近年では実写と見紛うほど高品質なCG映像も見られるようになってきた。だが、自然の物体や自然現象の表現にはまだまだ不十分な点も多く、特に樹木のCG表現に関しては建築設計の景観シミュレーションの部品等しか目立った応用がなく、十分な研究がなされてきたとはいえない。

しかしながら、樹木の画像生成に関する研究は景観シミュレーションだけでなく、植木や街路樹等の植樹、剪定の事前評価や生長の予測、木製品の工業デザインや、樹木の画像、形態のデータベース等にも応用が可能であり、また、エンターテインメントの分野として、CGによる庭園や、植木や盆栽のシミュレーションのようなものも考えられる[5]。樹木の画像生成に関する研究は今後より一層重要度を増すであろう。

5.2 今後の課題

本研究ではそれぞれの課題に対して一応の成果を得ることができたが、その一方、今後の課題として解決しなければならない問題も多く残されている。以下では、そうした課題のいくつかを指摘する。

本論文の生長モデルは様々な樹種への対応、環境の影響への対応、樹木の性質の再現などが可能であるが、それぞれ、まだ十分とはいえない。本論文の生長モデルでは個々の枝の生長を単一の処理で行なっているため、針葉樹のように幹と横枝の伸び方が異なる樹種を生成することが困難である。ただ、針葉樹の生長は枝の伸び方以外にも、枝の屈光性が広葉樹のようにはっきり現れないなどの差があるため、新たに針葉樹用の生長モデルを構築する方が良い可能性もある。また、環境も現在は光の影響しか考慮していないが、現実の樹木を考えると風、重力、水などを考慮す

ることも必要になる。樹木の性質でも、枝の二次伸長（一度生長し終えた枝が再び生長する現象）など、現状では表現できない性質もある。そのほか、花や果実の表現や、自動あるいは対話的な剪定の実現なども考えられる。ただ、全ての要素を取り入れるとなると、必然的に処理時間が長くなり、制御も難しくなるため、追加する処理の取捨選択も重要な課題である。

樹木の揺れの表現に関しては、本研究の運動モデルは多様な樹形への対応、任意の強さの風による揺れの表現、高速な計算の3つの条件を満たしているが、節点は現状では世代ごとの各枝の先端に設定しており、これは必ずしも最適な節点位置であるとはいえない。また、さまざまなパラメータも樹形や樹種に応じて最適な値を自動的に設定することができれば樹木の揺れのアニメーションをより容易に実現することができるが、今のところは半ば人手に頼る必要がある。また、今回は風を樹木全体に同じ方向、同じ強さで与えたが、現実には風は樹木に当たることでその強さや方向が複雑に変化する。よりリアルな揺れのアニメーションを行うには風の流場の場の計算も行う必要があるが、計算時間は大幅に増加することが予想されるため、実装するかどうかは十分に検討する必要がある。そのほか、強風による枝の折損や樹木全体の倒壊などの表現も考えられる。

樹木画像の高速表示については、現状では初期状態の視点位置によって各枝の描画方法を決定しているため、視点変更を行なった場合、表示された枝を不自然に感じる可能性がある。これを解決するには視点位置の変更に対応して枝の描画方法を変更する必要がある。また、葉の表示には図 5.1(a) のように枝ごとに1枚のポリゴンを用いているが、この方法では葉の本来の法線方向とポリゴンの法線方向が異なり、葉が正しく表示されないことが多い。また、葉をもつ枝数分のポリゴンを用意する必要があり、枝の多い樹木では十分な高速化が実現できない可能性がある。そこで、図 5.1(b) のように複数の枝の葉をまとめて1枚～数枚のポリゴンで近似して表示することによるデータ量削減と表示の高速化を考えている。

最後に、樹木の画像生成という研究テーマ全般に関する課題について述べる。

本論文では、樹木の形状データ作成、樹木の揺れの表現、樹木画像の高速生成という3つのテーマに関して研究を行なったが、これらは樹木の画像生成に関する研究のなかの一部分に過ぎない。未だに研究の不十分な、あるいはほとんど手のつけ

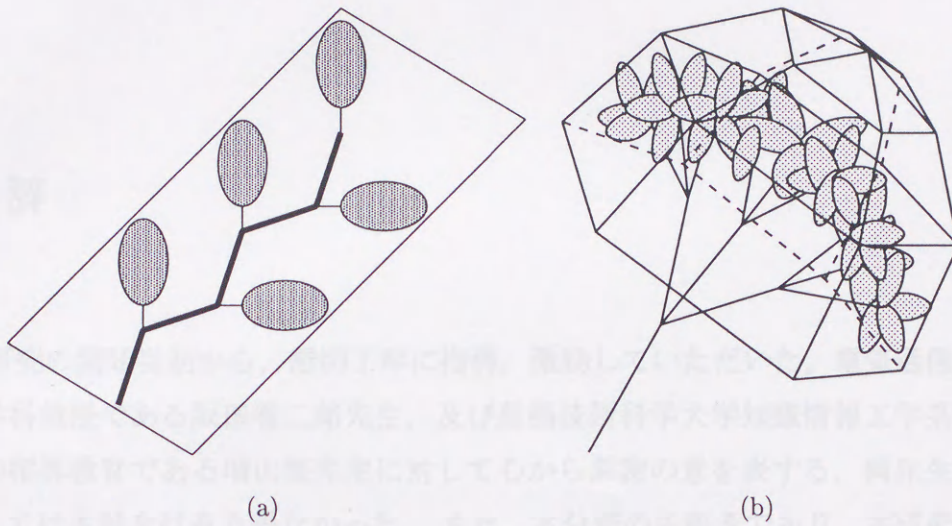


図 5.1: 葉のテクスチャ生成

られていないテーマとして、花、果実の表現やその形態変化、根の表現、生長に伴う樹皮の変化、傷跡や枝の折れ跡の表現などがあるが、これらをどこまで取り入れるかは対象とする応用においてどれだけリアルな表現が必要かということに依存する。

また、レンダリングでは森林などの樹群の表示手法や、写実的な画像ではなく、絵画やイラスト風の樹木画像を得るためのレンダリング手法なども必要であろう。

さらに、雑木林など、複数の異なる樹種が存在する環境での生長シミュレーションや、森林等の生態系のシミュレートを取り入れることで単なる画像生成の研究ではなく、生物としての樹木のシミュレーションも可能となりうる。

一般に自然物や自然現象をコンピュータで表現することは容易ではないが、多くの研究者たちの努力によって非常にリアルな表現も可能になってきた。上記の内容を実現するため、今後もよりいっそうの努力を続けなければならない。

謝 辞

本研究の開始当初から、懇切丁寧に指導，激励していただいた，電気通信大学情報工学科教授である阪田省二郎先生，及び豊橋技術科学大学知識情報工学系教授で筆者の指導教官である増山繁先生に対して心から深謝の意を表す。両先生の援助なくしては本論文は有り得なかった。また，本分野の先駆者であり，本研究を行なうきっかけを与えて下さった岩手大学工学部教授の千葉則茂先生に対しても深く感謝する。

また，本論文作成に際し数々の有益なコメントをいただいた豊橋技術科学大学の磯田定宏教授，金子豊久教授，河合和久助教授の各先生に対しても，深く感謝する。

本研究の討論に参加していただき，また快適な計算機環境に整備するなど，執筆作業を陰で支えてくれた増山研究室の皆さんにも，お礼を申し上げたい。特に，豊橋技術科学大学の渥美清隆氏は同期生の友人であり，現在に至るまで様々な面での助言と協力をいただいた。氏に感謝の意を表す。

最後に，常に励まし，勇気付け，私の研究生活を影ながら支えてくれた両親に心から感謝する。

[6] 阪田省二郎，河野啓明，「植物観察入門（花・葉・果・根）」，成風館，1986。

[7] M. Helton, "Branches and Gravity and Botanical Tree Imagery", *COMPUTER GRAPHICS Forum*, Vol. 13, No. 1, pp. 57-67, 1994.

[8] J. Weber and J. Penn, "Generation and Rendering of Realistic Trees", *EUROGRAPH'95*, pp. 119-128, 1995.

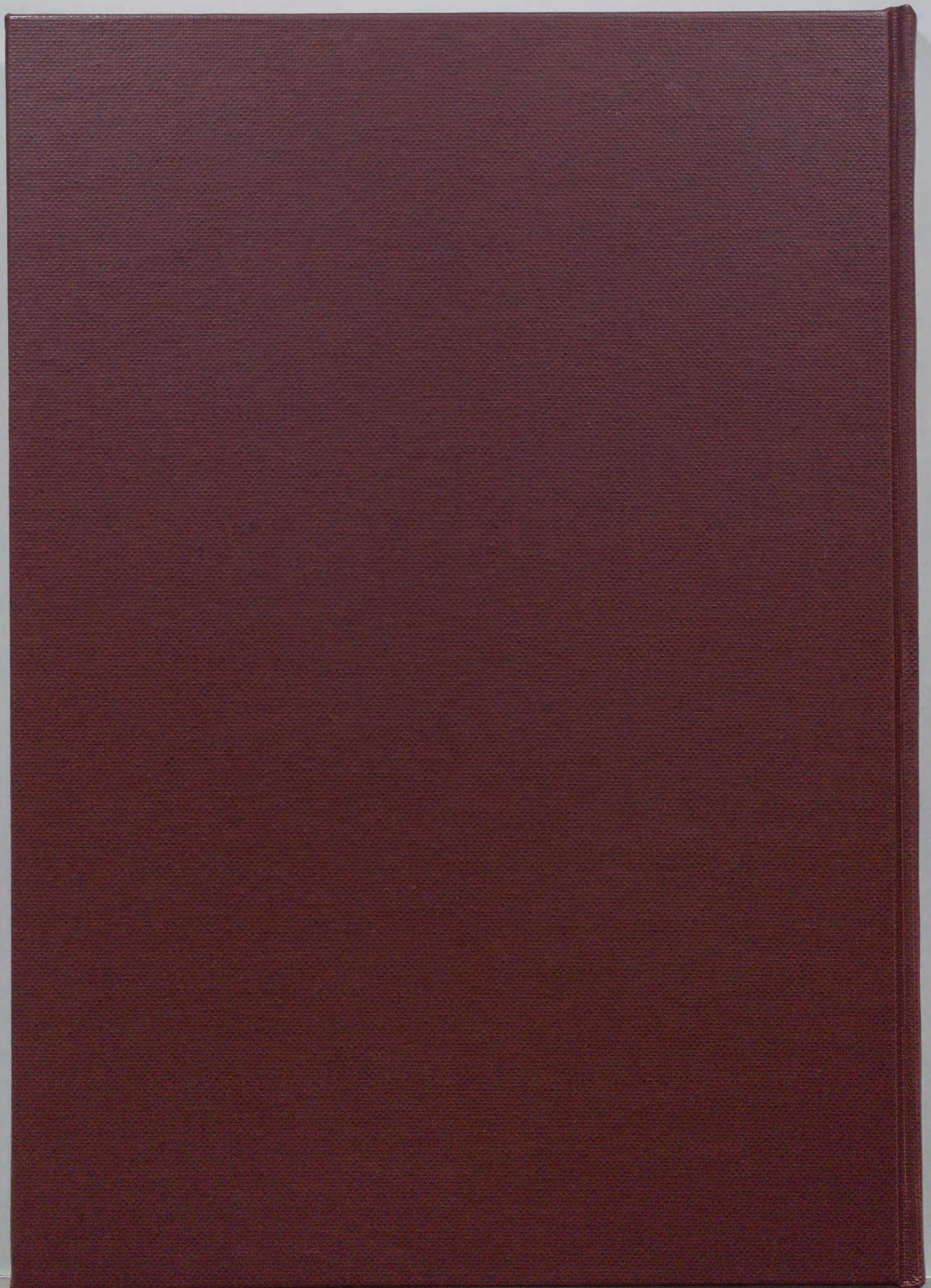
[9] 河野啓明，大島晃郎，早坂和文，「葉の折り紙モデルと枝元モデルによる植物の画像生成」，情報処理学会グラフィックスとCAD研究報告，96-CG-81，pp. 7-12，Feb. 1996。

参考文献

- [1] 安居院猛, 福田智美, 中嶋正之. “景観表示のための樹木の生成手法”. 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 5, pp. 618-625, May 1991.
- [2] M. Aono and T. L. Kunii. “Botanical tree image generation”. *IEEE Computer Graphics & Application*, Vol. 4, No. 5, pp. 10-34, May. 1984.
- [3] N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka, M. Miura, and N. Saito. “A growth model having abilities of growth-regulations for simulating visual nature of botanical trees”. *Computers & Graphics*, Vol. 18, No. 4, pp. 469-479, 1994.
- [4] 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 — 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-D-II, No. 8, pp. 1722-1734, Aug. 1993.
- [5] 千葉則茂, 大志田憲. “盆栽のビジュアルシミュレーションに向けた樹木の生長モデル”. 第10回 NICOGRAPH 論文コンテスト論文集, pp. 1-10, 1994.
- [6] 原襄, 福田泰二, 西野栄正. “植物観察入門 [花・茎・葉・根]”. 培風館, 1986.
- [7] M. Holton. “Strands and Gravity and Botanical Tree Imagery”. *COMPUTER GRAPHICS forum*, Vol. 13, No. 1, pp. 57-67, 1994.
- [8] J. Weber and J. Penn. “Creation and Rendering of Realistic Trees”. *SIG-GRAPH95*, pp. 119-128, 1995.
- [9] 海野啓明, 矢島邦昭, 早坂和文. “葉の折り紙モデルと枝先モデルによる植物の画像生成”. 情報処理学会グラフィックスとCAD研究報告, 96-CG-81, pp. 7-12, Feb. 1996.

- [10] 金山知俊, 増山繁. “テクスチャマッピングと線分描画による 3 次元樹木画像の高速生成手法”. 電子情報通信学会論文誌 (D-II) 掲載決定 (レター).
- [11] 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-II), Vol. J79-D-II, No. 8, pp. 1362-1373, Aug. 1996.
- [12] 金山知俊, 増山繁. “樹木の揺れのアニメーション”. 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J80-D-II, No. 7, pp. 1843-1851, Jul. 1997.
- [13] 金丸直義, 高橋清明, 千葉則茂, 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), Vol. J75-D-II, No. 1, pp. 76-85, Jan. 1992.
- [14] 河野充, 佐藤義人, 千葉則茂. “拘束節点による樹木の揺らぎのシミュレーション”. 情報処理学会グラフィックスと CAD 研究報告, 92-CG-59, pp. 9-16, Oct. 1992.
- [15] K.Tadamura, K.kaneda, E.Nakamae, F.Katoh, and T.Noguchi. “A Display Method of Trees by Using Photo Images”. *Journal of Information Processing*, Vol. 15, No. 4, pp. 526-534, 1992.
- [16] 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), Vol. J78-D-II, No. 7, pp. 1091-1104, Jul. 1995.
- [17] 桃井貞美. “枝分かれを考慮した木目の表現手法”. 情報処理学会論文誌, Vol. 35, No. 3, pp. 461-467, Mar. 1994.
- [18] 大崎恵一, 鈴木悌司. “光環境を考慮した樹木の生長モデル”. 情報処理学会グラフィックスと CAD 研究報告, 93-CG-65, pp. 37-44, Oct. 1993.
- [19] P. E. Oppenheimer. “Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees”. *Computer Graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 55-64, 1986.

- [20] A. Pentland and J. Williams. "Good vibrations: model dynamics for graphics and animation". *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 215-222, Jul. 1989.
- [21] P. Prusinkiewicz, M. James, and R. Mech. "Synthetic Topiary". *SIGGRAPH94*, pp. 351-358, 1994.
- [22] P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, and J. Haman. "Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes". *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 141-150, Aug. 1988.
- [23] P. Reffye, C. Edelin, J. Francon, M. Jaeger, and C. Puech. "Plant models faithful to botanical structure and development". *Computer Graphics*, Vol. 22, No. 4, pp. 151-158, Aug. 1988.
- [24] 新谷幹夫. "風による草木の運動モデル". 第43回(平成3年後期)情報処理学会全国大会講演論文集(分冊2), 2-465, Oct. 1991.
- [25] 早乙女良江, 藤代一成, 池辺八洲彦. "biological-based modeling に基づく紅葉の再現-樹木個体のレベルにおける色変化-". 情報処理学会グラフィックスとCAD研究報告, 93-CG-65, pp. 45-52, Oct. 1993.
- [26] 東海彰吾, 宮城真, 安田孝美, 横井茂樹, 鳥脇純一郎. "cg による柑橘果実の質感表現の一手法". 電子情報通信学会論文誌 (D-II), Vol. J76-D-II, No. 8, pp. 1746-1754, Aug. 1993.
- [27] P. F. Wareing, I. D. J. Phillips(古谷雅樹監訳). "Growth & Differentiation in Plants (植物の生長と分化(上・下))". 学会出版センター, 1983.
- [28] G. V. Xavier, E. Georges, J. Nicolas, and A. Didier. "Combinatorial Analysis of Ramified Patterns and Computer Imagery of Trees". *Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 31-40, Jul. 1989.
- [29] 四手井綱英, 斎藤新一郎. "落葉広葉樹図譜 冬の樹木学". 共立出版, 1978.



Inches 1 2 3 4 5 6 7 8
cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19

Kodak Color Control Patches

© Kodak, 2007 TM: Kodak

Blue

Cyan

Green

Yellow

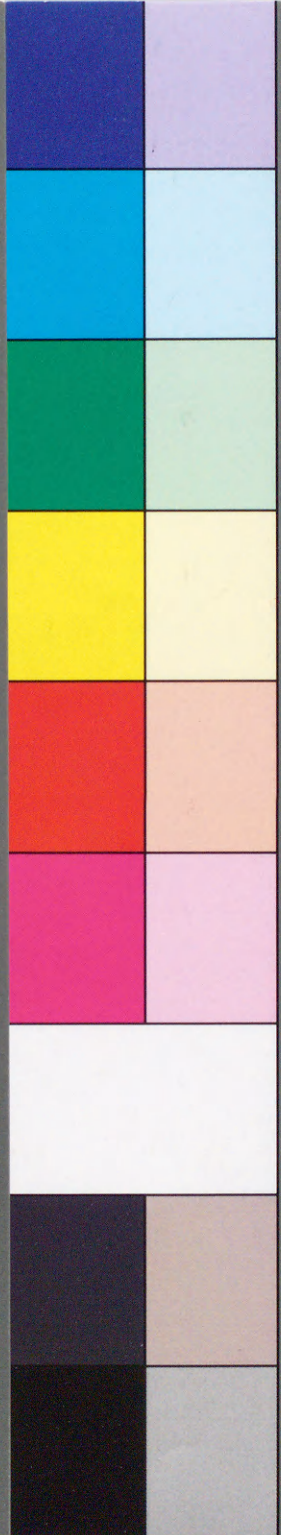
Red

Magenta

White

3/Color

Black



Kodak Gray Scale



© Kodak, 2007 TM: Kodak

A

1

2

3

4

5

6

M

8

9

10

11

12

13

14

15

B

17

18

19

