

論文

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——

正員 千葉 則茂[†] 非会員 大川 俊一[†]
 正員 村岡 一信^{††} 正員 三浦 守[†]

A Growth Model of Botanical Trees —— Generation of Natural Shapes of Trees Based on an Imaginary Plant Hormone ——

Norishige CHIBA[†], Member, Shunichi OHKAWA[†], Nonmember,
 Kazunobu MURAOKA^{††} and Mamoru MIURA[†], Members

あらし 樹木のCGによる画像生成は、自然景観のシミュレーションにおいて重要な位置を占める。庭園や公園、街路樹の並木など種々の建設計画における景観評価や、ヘリコプターなどの低空低速飛行機用フライトシミュレータやドライビングシミュレータのための景観シミュレーションにおいては、特にリアルな樹木の表現が必要となる。筆者らの一部はこれまでに、一様な枝の分布、広葉樹のような丸みのある樹冠の形成および自重によらない枝の枝垂れ形状を実現するためには、受光量不足による枝の枯死、枝先の向日性を考慮した生長モデルが有効であることを示している。本論文では、更に、樹木の性質である(a)頂芽優性、(b)休眠芽の休眠打破および(c)枝の幹化をも考慮した生長モデルによれば、これまでの生長モデルでは得られない複雑な形状の枝振りが実現できることを示す。この生長モデルでは、ある種の「植物ホルモン」の存在を仮定することにより、これらの性質を実現している。このことは、樹木全体の形状を監視し生長の仕方を制御する「中央制御装置」のようなものの存在を必要とせず、それぞれの芽が「ホルモン濃度」の絶対値や変化分に応じて発芽と生長を行うことにより、樹木全体としての形状が制御されるということの意味し、単純な生長モデルの開発という観点からも興味深いものとなっている。これまでにこのような生長モデルは提案されていない。

キーワード コンピュータグラフィックス、樹木、生長モデル、頂芽優性、休眠打破、枝の幹化

1. まえがき

樹木のCGによる画像生成は、自然景観のシミュレーションにおいて重要な位置を占める。庭園や公園、街路樹の並木など種々の建設計画における景観評価や、ヘリコプターなどの低空低速飛行機用フライトシミュレータやドライビングシミュレータのための景観シミュレーションにおいては、特にリアルな樹木の表現が必要となる。

リアルな樹木の表現を可能とする樹木の生成手法に

は以下のような能力が期待される。(I)は特に近接した自由な視点の移動や風による揺らぎの表現に重要⁽¹⁾であり、(II)と(III)は建設計画の景観評価や未来予想などに重要である^{(2),(3)}。

- (I) 3次元形状モデルが生成できること。
- (II) 多くの樹種とそれぞれの樹種に属する多様な樹形を生成できること。
- (III) 樹形の経年変化や季節変化がシミュレーションできること。

これまでの樹木や草木の表現法は、手続き的形狀定義法により3次元形状データを生成するものと、実写画像や生成テクチャによるマッピング手法によるものと大きく分けられる^{(2),(3)}。後者は現時点では実用的な手法として多用されており、特に遠景のシミュレーションに成功している⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾。しかしながら、原理的に近景

[†] 岩手大学工学部情報工学科, 盛岡市

Faculty of Engineering Iwate University, Morioka-shi, 020 Japan

^{††} 岩手県立盛岡短期大学, 盛岡市

Iwate Prefectural Morioka Junior College, Morioka-shi, 020 Japan

のシミュレーションや揺らぎの表現には難点があるため、前者の手法に関する研究も活発に行われてきている。本論文で提案する手法は、前者の手法に属するものである。

また、自然な印象をもつ「樹木らしさ」の表現、すなわち特に(II)のそれぞれの樹種に属する多様な樹形の表現や(III)の経年変化による樹齢に応じた樹形の表現には、「自然な枝振り」のシミュレーションが必要である。そのためには、遺伝的に定まる分枝パターンの生長シミュレーション^{(8)~(15)}のみならず、生長環境での獲得形状のシミュレーションが重要となる。

これまでに、いくつかの生長モデルが提案されてきており^{(2),(3)}、これらは大きく、

(1) 環境との対話性のないもの^{(8)~(18)}

(2) 環境との対話性をもつもの^{(19)~(21)}

とに分けられる。

(1)の環境との対話性のないものでは、枝振りは主に親枝からの分枝角度と枝の長さによりコントロールされ、得られる樹形は生育環境とは独立な「シナリオどおり」のものとなっている。そのため、遺伝的に定まるような分枝パターンは実現できても、自然な枝振りは生成されない。従って、生成される樹形は環境の影響を受けない規則的な分枝パターンをもつ一年草のような印象を受けるものが多い。その中でも文献⁽¹⁵⁾で示されている生長モデルは、さまざまな生長過程にある樹木から採取された詳細なデータベースに基づくものであり最も良好な樹形が生成できているようであるが、自然な樹形を実現する要因は明らかにされていない。もちろん、生育環境とは独立した「生長」を示すので、環境に応じた樹形は得られない。

これに対して、(2)の環境との対話性のあるものとして、受光量不足による枝の枯死を考慮に入れ、自然な枝の分布密度を与える生長モデルがいくつか提案されている^{(9)~(21)}。これは、空間的に枝が密集する部分では、枝同士が互いに光を遮り合うため枝の受光量は小さくなり、枝の枯死が起こるということに着目したものである。これにより、枝が密集した部分の枝が折れることによって自然な枝の分布密度が得られている。しかし、得られる樹形は基本的には枯死のない分枝による樹形(基本となっている分枝パターン)の部分形状となっているため、自然によく見られるような、

(1) 密集しながらも互いに枯死を避けるようにあたかも交信し合っているかのようにうまく空間へと広がる樹冠の形成(図1参照)、

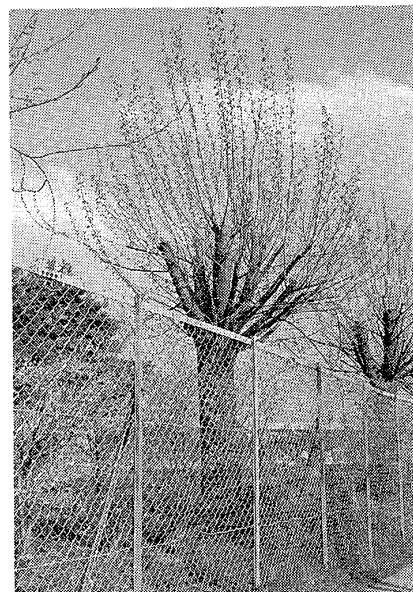


図1 樹形の特徴(1)と(4)の例

Fig. 1 An example of the features of trees (1) and (4).

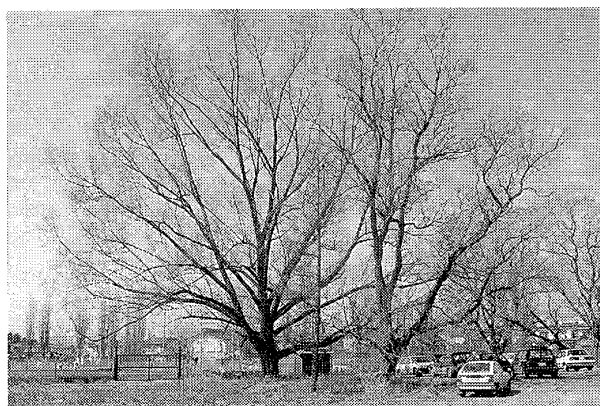


図2 樹形の特徴(2)と(5)の例

Fig. 2 An example of the features of trees (2) and (5).

(2) 光を求めて生長した軌跡のような枝垂れ形状(図2参照)、

(3) 古くなった幹からの発芽による樹形の複雑化(図3参照)、

(4) 剪定後に起こる多数の発芽による樹冠の再生(図1参照)、

(5) 広葉樹にも見られる幹のような大きな「枝の流れ」(図2参照)、

(6) 特に針葉樹で見られる幹化した枝(図4参照)、などは得られない。

筆者らの一部は、以前このような枝振りのうち、(1)、(2)、(4)の枝振りを実現するためには、枝先の向日性を考慮した生長モデルが有効であることを示した⁽²²⁾。本論文では、まずここで提案する生長モデルが包含す

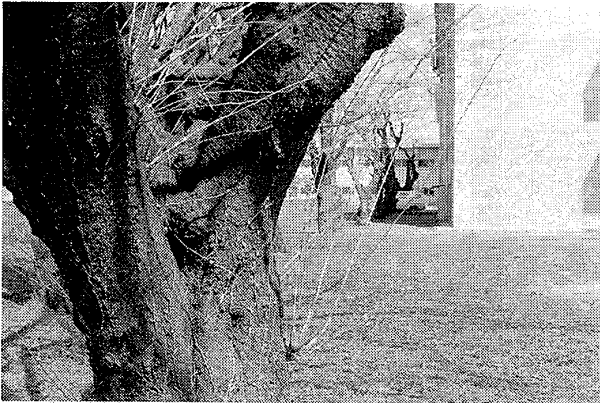


図3 樹形の特徴(3)の例

Fig. 3 An example of the feature of trees (3).

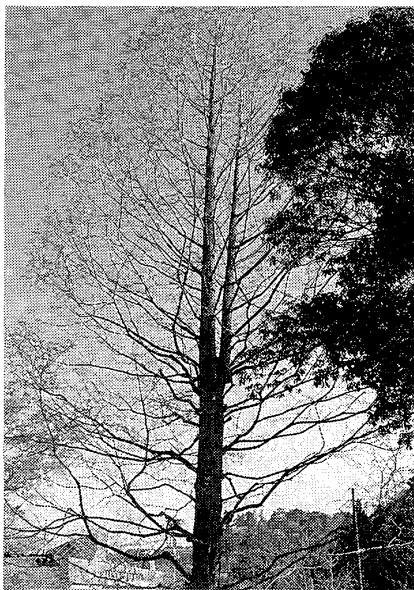


図4 樹形の特徴(6)の例

Fig. 4 An example of the feature of trees (6).

る向日性を考慮した生長モデル⁽²²⁾について簡単に述べ、次に(3), (4), (5), (6)のような枝振りを生成する生長モデルを提案する。この生長モデルではある種の「植物ホルモン」の存在を仮定し、以下の樹木の性質⁽²³⁾を実現している。

(a) 頂芽優性 頂芽から発芽した頂生枝が側芽から発芽した側生枝の生長を抑えて生長する性質

(b) 休眠芽の休眠打破 上方の枝が折れたり剪定を加えられると、その切り口付近からの休眠芽が発芽する性質

(c) 枝の幹化 幹が折れたときにその代わりにするような枝が現れる性質

本論文では、いくつかのシミュレーション例により、これらの性質が(3), (4), (5), (6)のような発芽や

枝振りの形成に有効であることを示す。すなわち、仮定した植物ホルモンにより特定の枝に幹としての強さを与えることにより「頂芽優性」を実現し、幹が形成されることを示す。これにより、低木ばかりではなく高木広葉樹や針葉樹のような樹形が得られる。特に、広葉樹では複数の幹のような枝の流れのある樹形となる。更に、「休眠打破」を行うことにより樹形が複雑になる様子が実現できることを示す。最後に、植物ホルモンにより「枝の幹化」を実現し、1本の幹が何らかの理由により折れた後に近傍の枝が幹化する様子が生成できることを示す。これまで、このような生長モデルは提案されていない。

ここで、樹木の形状定義には、

- ・骨格形状の定義、
- ・幹や枝の太さの定義、
- ・樹皮形状の定義、
- ・葉の形状と分布の定義、

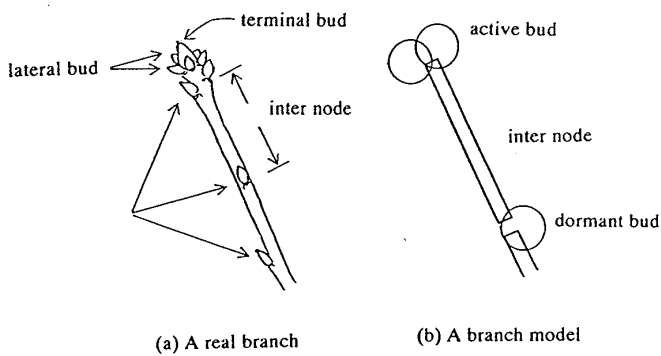
などが必要とされるが、本論文は最も基本的な骨格形状の定義法に関するものであることを断っておく。更に、本論文は特定の樹種の表現に重要となる分枝パターンに関するものではなく、さまざまな樹種に共通する「樹木らしさ」を感じさせる自然な樹形の表現に関するものであることも強調しておく。

2. 向日性を考慮した生長モデル

本章では、本論文で提案する生長モデルの説明に必要なとなる既発表の生長モデル⁽²³⁾の機能、すなわち受光量不足による枝の枯死と向日性について説明しておく。また、分枝モデルに関する用語の定義も行う。

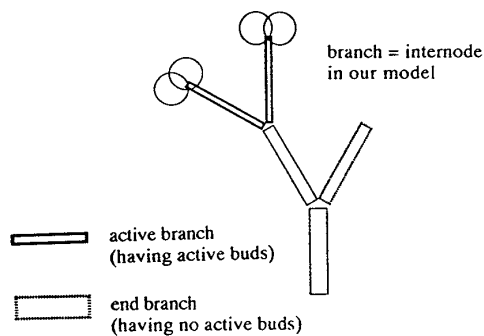
2.1 分枝モデル

一般的に枝は図5(a)のような構造をしている⁽²³⁾。芽があるところを節と言ひ、節と節の間を節間と言ひ。節間は比較的短い期間に伸びきり、その後は太る方向にしか生長しない。芽は、先端の節にある「頂芽」と、節間と節間の間の節と頂芽のまわりにある「側芽」に分けられる。ほとんどの頂芽は発芽するのに対し、側芽の多くは発芽せず「休眠芽」となる場合が多い。考慮する樹木の性質の樹形への効果を示すのが目的であるので、基本とする分枝モデルは単純な方がよい。そこで本論文では、図5(b)のように一つの枝が一つの節間からなる単純な分枝モデルとしている。更に、本章で使用する分枝モデルは、向日性の効果がよりよくわかるように、すべての節間は同じ長さ L をもち、左右の分枝角 θ_1 と θ_2 の等しい単純な2分木とする。すなわ



(a) A real branch

(b) A branch model



(c) An active branch and an end branch

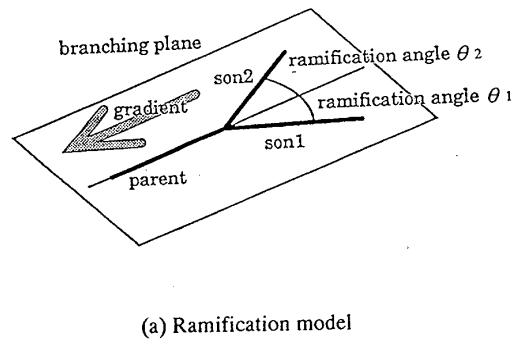
図5 使用する分枝モデル
Fig. 5 Employed branching system.

ち、先端の節だけに頂芽、側芽の区別がない二つの芽（これを活性芽と呼ぶ）をもつ分枝モデルとする。この活性芽をもつ節間を特に「生長枝」と呼ぶ。枝折れによって生じた活性芽をもたない先端の枝は単に先端枝と呼ぶ（図5(c)参照）。

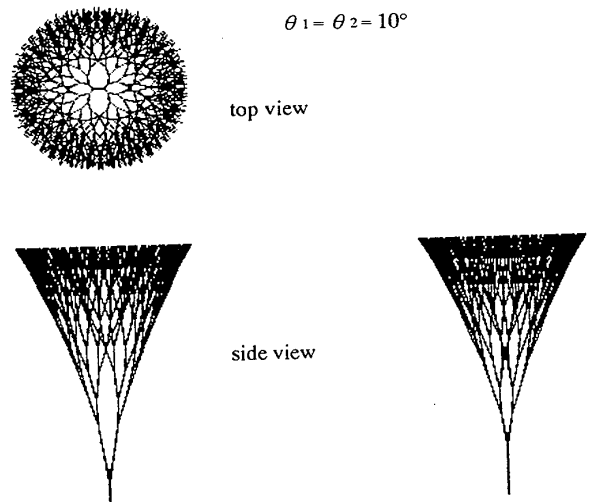
この単純2分枝モデルの生長は、座標の決定している初期親枝から始め、その親枝をもとに子枝（子節間）を生成し、更にもその子枝をもとに新しい子枝を生成するというを次々に繰り返すことにより行われる。右の子枝（左の子枝）の座標は、親枝を含み、親枝の向きと面の最大傾斜方向が一致する面（面の法線ベクトルを N 、親枝のベクトルを P 、鉛直ベクトルを Z とすると $N = (P \times Z) \times P$ となる面）を考え、その面上でまず親枝の延長線上に新しい枝を考える。次に、親枝の先端を中心に、この面上で右回り（左回り）に分枝角度 θ_1 (θ_2) だけ回転させることで得られる（図6(a)参照）。 $\theta_1 = \theta_2 = 10^\circ$ としたときの分枝モデルを図6(b)に示す。

2.2 受光量不足による枝の枯死と向日性の実現

受光量不足による枝の枯死を実現するために、まず葉の受ける受光量を求め、これをあらかじめ設定されたしきい値（枯死しきい値 T_d と呼ぶ）と比較することによりその枝の枯死、生存を決定している。光につい



(a) Ramification model



(b) A generated shape of tree

図6 単純2分枝モデル
Fig. 6 A simple dichotomy model.

ては、水平面から下の半球も含めて、天球のすべての方向からのものを考慮している。これは、地面からの照返し（間接光）も無視できないためである。

向日性は、葉に対して平均的に最も光が到達する方向（受光ベクトルと呼ぶ）に枝先の向きを修正することで実現している。なお、計算を簡単化するため平均的な方向を受光ベクトルの方向としているが、もちろん強く照射される方向が複数存在する場合には、いずれか一つの方角を選択する方がより妥当であると考えられる。

受光量および受光ベクトルの計算法の概略は以下のようである。まず、一つの枝の葉群を葉球と呼ぶ光の減衰率 a が定義された半径 R の球で近似する（図7参照）。一つの葉球の受光量を求めるためには、その葉球を中心とする天球を考え、天球のそれぞれの区画（適当な間隔で定義された緯度・経度線で分割された小領域）に適当な光の強さを与えておく（図8参照）。本論文でのシミュレーションでは、上半球、下半球が一樣に単位面積当りの光の強さ I_u, I_l をもつように与えている。

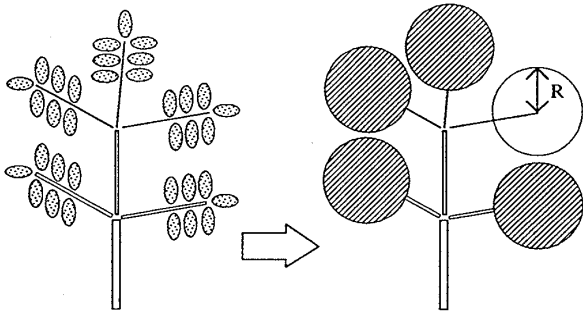


図7 「葉球」
Fig. 7 "Leaf-balls".

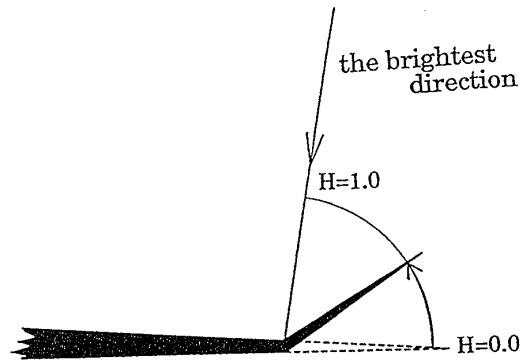


図9 向日性の実現
Fig. 9 Realization of heliotropism.

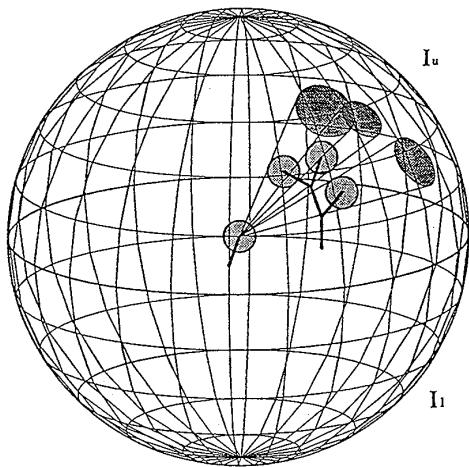


図8 天球
Fig. 8 The celestial sphere.

次に、その葉球を視点とし、天球をスクリーンとした隠面消去法 (Z-バッファ法やレイキャスティング法) と同様のアルゴリズムにより、受光量 (天球の可視領域に関する光の強さの積分値) を求める。受光ベクトルは、葉球からそれぞれの区画に向かうベクトルにその区画から受ける光の量で重み付けした総和で定義する。

このようにして求めた受光ベクトルの向きに枝先の向きを一定の割合で回転させることにより向日性を実現する。向日性の強さ H が弱い場合には割合を小さく、強い場合には大きくする (図9参照)。すなわち、 $H=0.0$ で向日性の効果なしとし、 $H=1.0$ で枝先の向きを受光ベクトルと一致させ向日性最大としている。

2.3 シミュレーション例

ここでは、前述した自然な枝振りのうち、(1)の丸みを帯びた樹冠の形成と(2)の受光量不足による枝垂れ形状が、枝先の向日性により実現されることを、筆者らの一部による既発表論文より引用しておく⁽²²⁾。(4)の樹冠の再生については発芽とも関連するので、4.で提案する生長モデルのシミュレーションで示す。

単純2分枝モデルでランダムに枝折れを行った例を図10(a)に、受光量に基づいて枝折れを行った例を図10(b)に示す。(a)では、枝が非常に混雑した部分と、枝がなく穴が空いたような部分ができている。(b)では、枝の混雑が避けられているが、向日性がないため枝の広がり方は(a)と同様であり、もちろん枝垂れや枝の回り込みは見られない。(a)、(b)ともに枝折れのない単純2分枝モデルの部分形状となっている。

図10(c)から(f)には、枝の枯死と向日性を組み込んで得られた例を示す。(c)から(f)は、徐々に向日性を強く示した例である。向日性が強くなるに従い、丸い樹冠が形成され枝垂れがはっきりと現れてくる。また、より光の多い所に枝を伸ばすことができるので、枯死せずに生き残る枝の本数が増えてくる。(a)と(d)を比較すると、(d)の方では枝先端の分布がうまく広がっていることが上面図より確認できる。図10では枝先端の分布を示すために、葉球を丸で示している。

3. 頂芽優性、休眠打破、および枝の幹化を考慮した生長モデル

本章では、ある種の「植物ホルモン」の存在を仮定すると、樹木の生長枝それぞれが独立にそのホルモンの量や変化に応じて行動 (発芽や生長) することにより、頂芽優性、休眠打破および枝の幹化が実現できるような生長モデルを提案する。このことは、樹木全体の形状や枝折れなどの、生存に重要な出来事を監視し、生長を制御する「中央制御装置」の存在を必要としないことを意味する。これは、生長モデルという観点からは非常に興味深いことである。次章では、シミュレーション例により提案する生長モデルの有効性を示す。

3.1 植物ホルモンによる生長モデル

植物はその生長を制御するのに、植物ホルモンと呼

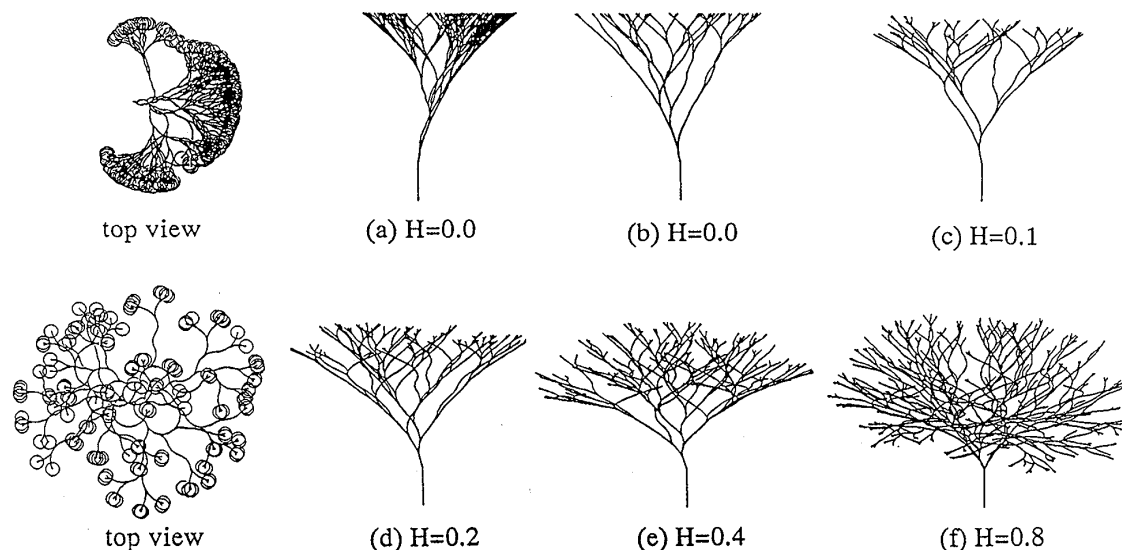


図 10 向日性のシミュレーション
Fig. 10 Simulation of heliotropism.

ばれるものを生成することによって行っていると考えられている^{(24)~(26)}。実際に植物ホルモンが樹形に大きく影響を与える性質として、頂芽優性休眠打破および枝の幹化などがある。ここで、休眠打破は芽の性質であり、枝の幹化は生長枝の性質であることを注意しておく。

このような植物ホルモンとしては、オーキシン、ジベレリン、サイトカイニン、アブシジン酸、エチレンなどの存在が知られているが、それらの役割は断片的に解明されているだけであり、現時点でモデル化に直接利用可能なメカニズムとしては明らかにされていない。本論文では、他の枝の生長を抑制する架空の「植物ホルモン(抑制ホルモン)」の存在を仮定することにより、これらの性質が実現できることを示す。

この抑制ホルモン(以下、ただホルモンと言う)の性質を以下のように仮定する。

[仮定 1] ホルモンは、生長枝でのみ生成される。

[仮定 2] 分枝後、ホルモンは、隣接するすべての節間に伝搬し平衡状態に向う。但し、生長枝と根での濃度は常に一定(後で定義する生長枝のホルモン濃度 H_A)に保たれ、「根」の濃度は 0 とする(図 11 参照、以下、図では「根」を明示しない)。

[仮定 3] ホルモンによる抑制の効果を無視した場合には、頂生枝は、親枝のホルモン濃度をそのまま継承するのに対して、側生枝は、それよりも減少する。

濃度平衡状態において、生長枝のホルモン濃度が親枝のホルモン濃度よりも高いとき、すなわち濃度こう配が生長枝向きであるときは、この生長枝は他の枝か

ら抑制されていないものとする。また、生長枝のホルモン濃度が親枝のホルモン濃度よりも低いとき、すなわち濃度こう配が親枝向きであるときは、この生長枝は他の枝から抑制されているものとする。

例えば図 11 のような濃度平衡状態では、枝 5、10(図では丸で囲まれている)は濃度こう配が生長枝向きであるため、抑制を受けていないことになり、枝 3、6、11 は濃度こう配が親枝向きであることから抑制されていることになる。

[仮定 4] 生長枝が他の生長枝から抑制されているときは、分枝後の生長枝で生成されるホルモンは親枝と同等となるのに対して、抑制されていないときは、分枝後の生長枝で生成されるホルモンは親枝より増加するものとする。

[仮定 2] は以下のアルゴリズムで実現する(図 12 参照)。

(0) $D_i(t)$ を節間 i の時刻 t でのホルモン濃度、 β を濃度伝達係数とする。但し、 $0 < \beta < 1$ 。

(1) すべての節間 i が濃度平衡状態になるまで、以下の操作を繰り返す。

(1-1) i のすべての隣接節間 j について並列的に、以下の計算を行う。

$$D_i(t+1) = D_i(t) + \beta \sum_{j \neq i} (D_j(t) - D_i(t))$$

[仮定 3] と [仮定 4] は以下のように実現する。

(0) 初期親枝に最大ホルモン濃度を与える。

(1) すべての生長枝について以下の操作を行う。

(1-1) 発芽する枝により、頂生枝による側生枝の生長

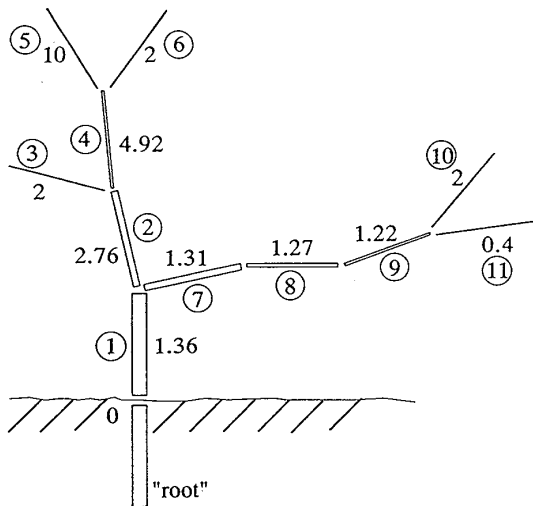


図 11 ホルモン濃度の分布
Fig. 11 Density distribution of hormone.

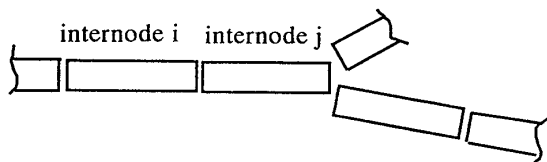


図 12 ホルモン濃度の伝搬
Fig. 12 Density transmission of hormone.

抑制の程度を与える抑制係数 $\delta(0 < \delta \leq 1)$ を決定する.

$$\delta = \begin{cases} 1 & \text{頂生枝のとき} \\ \delta_0 (\leq 1) & \text{側生枝のとき} \end{cases}$$

(1-2) 生長枝とその親枝の濃度こう配を求め、抑制が解除された場合の生長力の程度を与える回復係数 $\gamma (\geq 1)$ を決定する.

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_0 (\geq 1) & \text{濃度こう配が先端向き} \\ & \text{(抑制解除状態)} \\ 1 & \text{濃度こう配が根もと向き} \\ & \text{(抑制状態)} \end{cases}$$

(1-3) 分枝後の生長枝にホルモン濃度 H_A を与える.

$$H_A = \max\{H_p \cdot \delta \cdot \gamma, \text{最大ホルモン濃度}\}$$

H_p : 分枝する親枝のホルモン濃度

3.2 分枝モデル

本章でも、考慮する性質の樹形への効果を示すために、分枝モデルは 2. で述べた単純 2 分枝モデルとする。但し、生長枝の生長の勢いの違い(ホルモン濃度)を考慮しているので、分枝角については以下のように定めたいものを用いる。

生長枝にある活性芽は、乱数により一方の芽を頂芽、他方を側芽と決める。図 13(a) のように頂芽から発芽

する頂生枝の分枝角を θ_1 、側芽から発芽する側生枝の分枝角を θ_2 とする。なお、 θ_1 と θ_2 は、 $\theta_1 \leq \theta_2$ という関係が成り立つものとする。 $\theta_1 = 10^\circ$ 、 $\theta_2 = 30^\circ$ としたときの分枝モデルを図 13(b) に示す(環境との対話性のない生長モデルでよく見られる片寄り形状の印象的な分枝パターンが得られる)。

3.3 頂芽優性

樹木には、高木広葉樹や針葉樹のような頂芽優性の強い樹種と、低木のような頂芽優性の弱い樹種がある。頂芽優性の強い樹種は、頂生枝と側生枝ではその伸長量に大きな差がある。これに対して、頂芽優性の弱い樹種では、その差は小さい。

本論文では、すべての節間の長さが等しい分枝モデルを使用することから、枝の勢いによる伸長量の違いは、節間の長さの異なるモデルを使用する代わりに、ホルモン濃度に応じた分枝頻度で実現している。この分枝頻度は、濃度が高い(勢いのある)枝ほど高くなるように定めている(ここでは単純に図 14 のように定めている)。

3.4 休眠打破

勢いのある枝がなくなると、切り口付近の枝(節間)のホルモン濃度が減少する。これにより、枝は他の枝に異常があったことを感知して休眠芽を発芽させる。本論文では、子枝が 1 本しかない枝と先端枝を休眠芽をもつ枝とした(図 15 参照)。

例えば、図 16 のように枝 10 に枝折れが生じると、枝 7、枝 8、枝 9 の濃度が減少し、これらの枝から休眠打破が起こる(枝番号は図 11 と同じである)。また、図 17 のように樹木が生長するにつれ、古い幹や枝が生長枝から受ける抑制が減少し、その抑制が解除された場合にも休眠芽が発芽する。

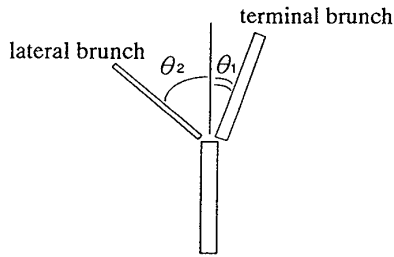
ここでは、以下のように実現している。

<休眠打破>

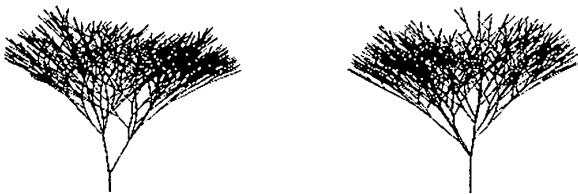
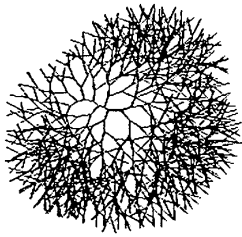
枝(節間)の時間的な濃度差(変化分) ϵ がしきい値 ϵ_0 より大きいまたは濃度がしきい値 η よりも小さい、かつその枝に休眠芽があれば、休眠打破を行う。但し、休眠打破により発芽する枝は、角度 θ_b の円すいの範囲でランダムな方向に分枝する。また、発芽する枝に与えるホルモン濃度 H_b は、最大ホルモン濃度よりも小さい定数とする。

3.5 枝の幹化

抑制されていた生長枝の親枝のホルモン濃度が減少して抑制が解除されると、生長枝は抑制していた枝に異常が生じたことを感知し、生成するホルモンを増加



(a) Ramification angle



(b) An example of the new branching pattern

図 13 分枝モデルの変更

Fig. 13 Modification of the branching system.

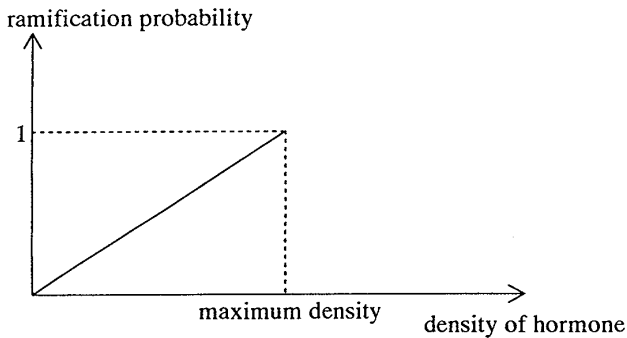


図 14 分枝頻度

Fig. 14 Ramification frequency.

させる。この生長枝は、幹化することにより湾曲して生長する(実際の樹木では、幹化する枝には負の重力屈性が強く現れると考えられ、ここではこれを上方に湾曲させることで表現している)。例えば、図 18 のように枝 5 に枝折れが生じると、枝 3 と枝 6 それぞれの親枝である枝 2 と枝 4 の濃度が減少し、抑制が解除される(枝番号は図 11 と同じである)。ここでは、以下のように実現している。

<枝の幹化>

生長枝の抑制が解除され、かつその親枝の時間的な

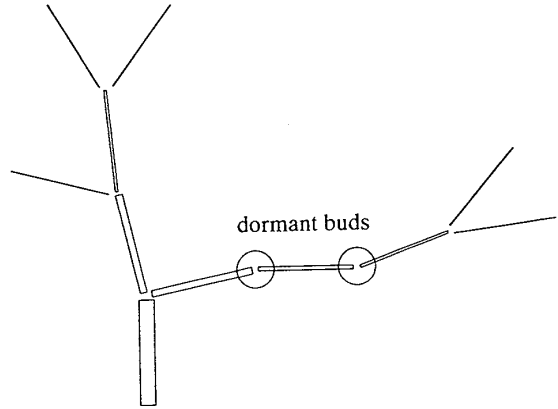


図 15 休眠芽

Fig. 15 Dormant buds.

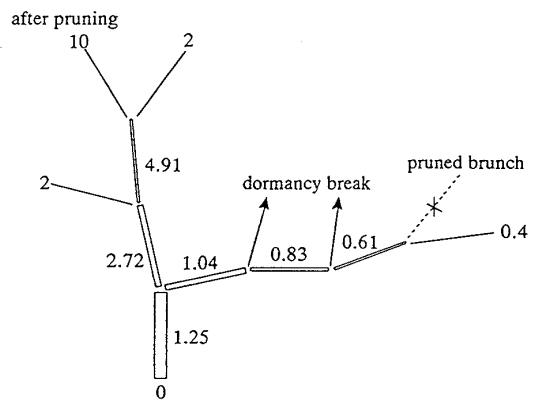
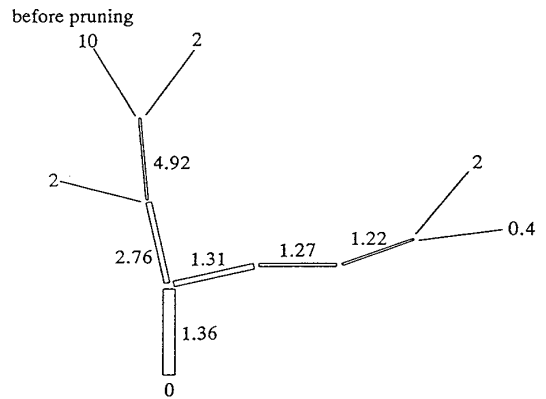


図 16 濃度変化による休眠打破

Fig. 16 Dormancy break due to sudden decrease of density.

濃度差(変化分) κ がしきい値 λ よりも大きい幹化すべき生長枝について、そのホルモン濃度 H_G を次のように定める。

H_G = 最大ホルモン濃度

また、このホルモン濃度の急激な変化により、幹化しなければならぬと認識した生長枝には、幹化による湾曲を実現するために、一定の割合 G で鉛直方向に

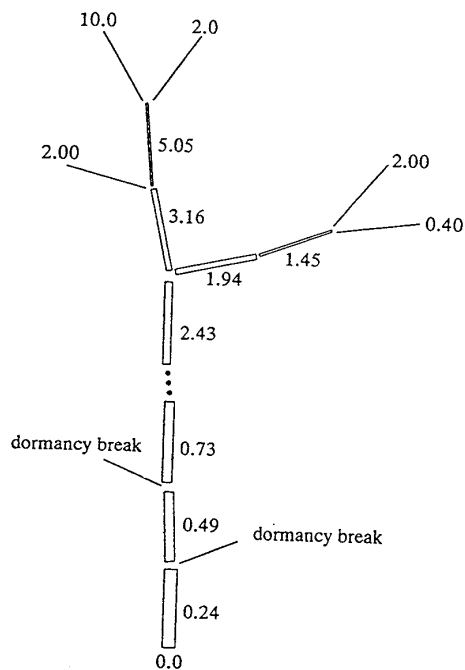


図 17 抑制解除による休眠打破

Fig. 17 Dormancy break due to release from inhibition.

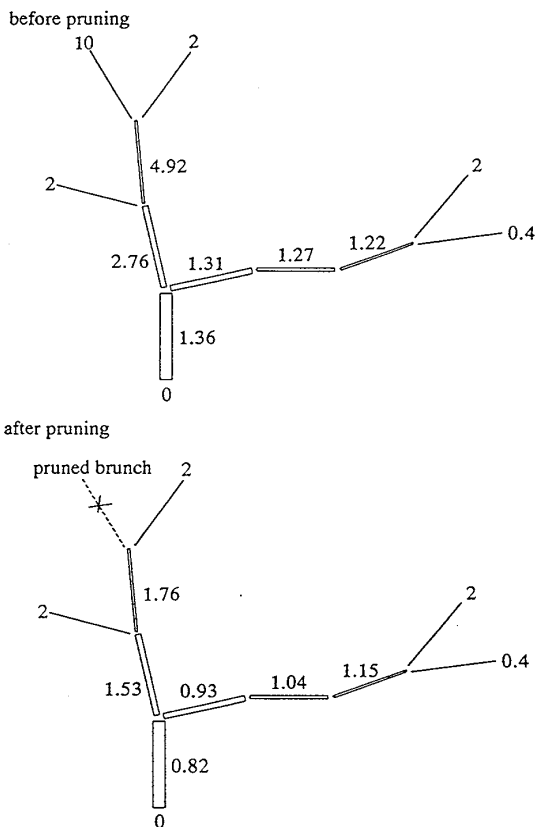


図 18 枝の幹化

Fig. 18 Change in leadership

回転させる (図 19 参照).

4. シミュレーション

本章では、前章で提案した生長モデルによる樹形のシミュレーション例を示す。

以下のシミュレーション例では、考慮した性質を“+”記号で連結し括弧で囲んで示すことにする。但し、受光量不足による枝の枯死の性質は単に「枯死」と表すことにする。また、自然の樹木では、枝の寿命や群生による受光量不足のための枯死、および剪定などにより根元に枝を付けない樹形が形成される場合もあるが、ここでは考慮していないことを断っておく(この点については「むすび」で触れる)。

ここで、シミュレーションにおいては、向日性のパラメータは、葉球の半径 $R=20$ 、受光量枯死のしきい値 $T_b=40$ 、向日性の強さ $H=0.4$ で一定である。また、休眠打破では、休眠芽の発芽方向を定める円すいの頂角 $\theta_D=30^\circ$ である。

図 20 に、(頂芽優性)の例を示す。 δ_0 が小さい方が勢いのある枝とない枝の差が大きく、幹のような枝の流れ(図では、太い枝の列)が顕著に現れる(δ_0, γ_0 がともに大きいほど、図 13 に示した基本となっている分枝パターンに近づくことに注意されたい)。一方 γ_0 が大きくなるほど、幹のような枝の流れが複数現れてくる。図 21 に、(枯死+向日性+頂芽優性)の例を示す。図 20

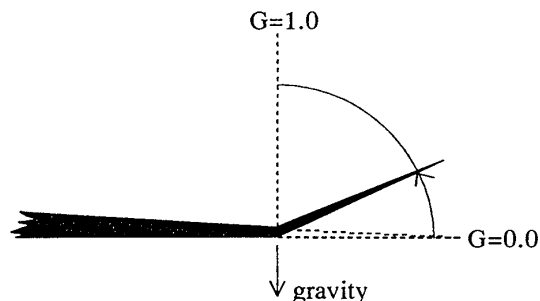


図 19 幹化

Fig. 19 Turn to a trunk.

と比べ、基本とする分枝パターンの「すりばち状に枝を広げる幾何学的」印象が消える。また、枝の密集が避けられ枝の分布が均等になっている。

図 22 に、休眠芽のシミュレーション例を示す。(a)、(c)が休眠打破がない場合、すなわち、(枯死+向日性+頂芽優性)であり、(a)、(b)にはランダムな折れが施されている。(b)、(d)はともに(枯死+向日性+頂芽優性+休眠打破)の場合でそれぞれ(a)、(c)に対応しており、(b)はホルモン濃度差しきい値 ξ による休眠打破を、(d)はホルモン濃度のしきい値 η による休眠打破を考慮したものである。(b)では特に枝折れのあった

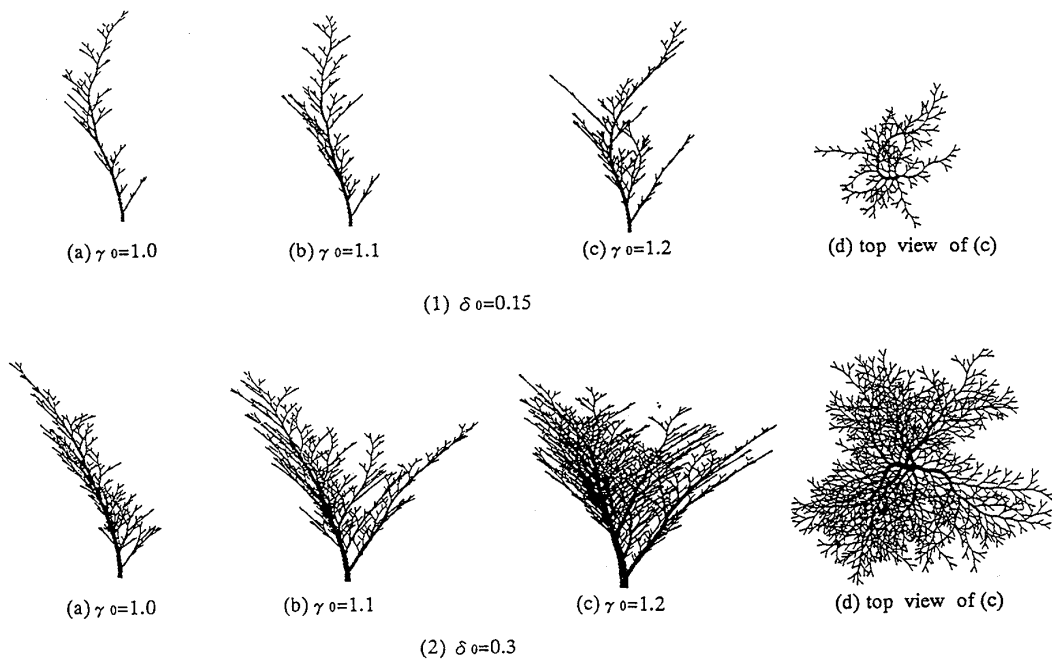


図 20 (頂芽優性)
Fig. 20 (Apical dominance.)

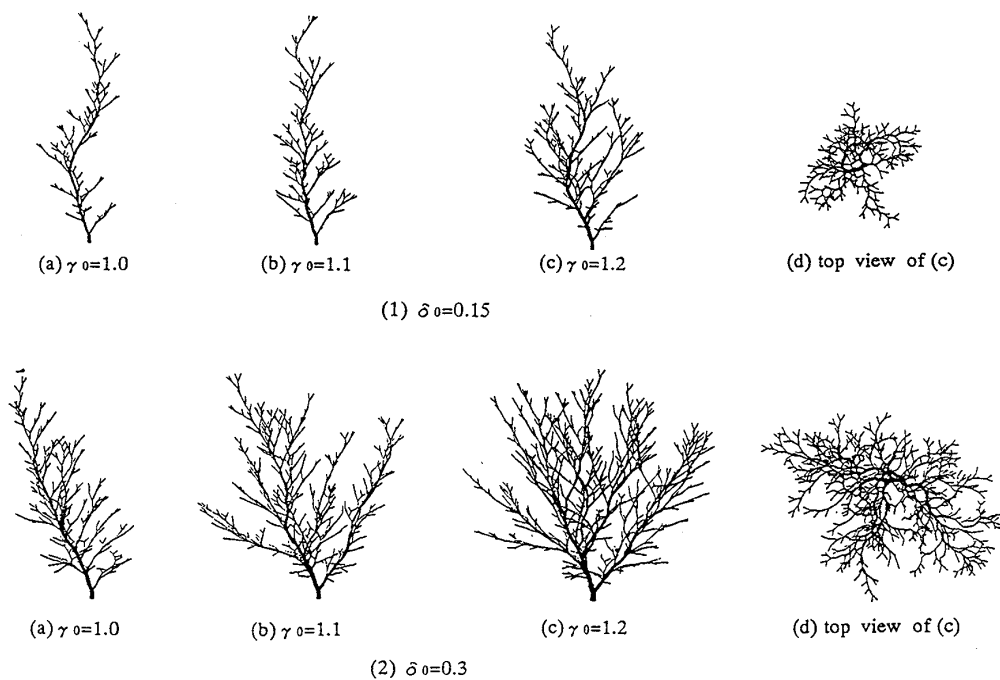


図 21 (枯死+向日性+頂芽優性)
Fig. 21 (Death+heliotropism+apical dominance.)

近傍で、(d)では、特に根もとに近い部分で枝の発生が確認できる。図 23 は (枯死+向日性+頂芽優性+休眠打破) であり、生長途中で、すべての枝を剪定し、それ以降の生長をシミュレーションしたものである。剪定と共に休眠芽が発芽し、再び自然な樹形が形成されているのが確認できる。図中の step 数は生長(分枝)の回

数を表す。

図 24 に、枝の幹化のシミュレーション例 (枯死+向日性+頂芽優性+枝の幹化) を示す。折れた幹の近傍の枝がホルモン濃度の変化を認識し幹化することにより、二つの枝の流れを形成しているのがわかる。

以上の例より、休眠打破、頂芽優性および枝の幹化

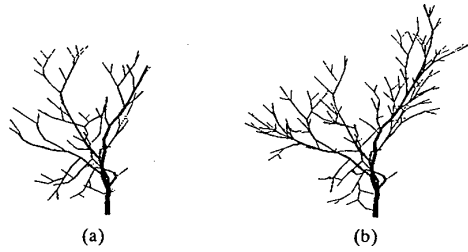


図 22 (枯死+向日性+頂芽優性+休眠打破)
Fig. 22 (Death+heliotropism+apical dominance+dormancy break.)

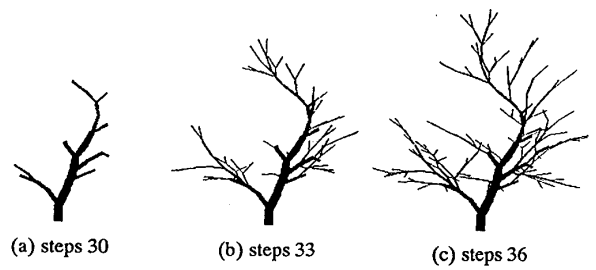


図 23 休眠打破(剪定)
Fig. 23 Dormancy break (due to pruning).

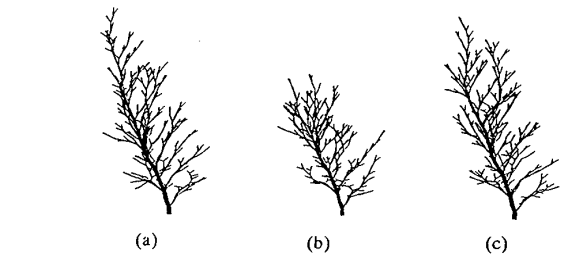
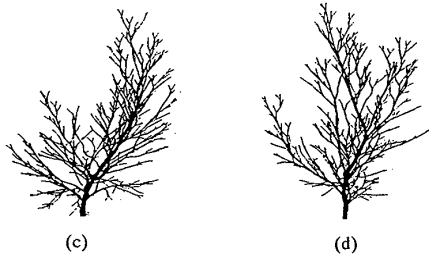


図 24 (枯死+向日性+頂芽優性+枝の幹化)
Fig. 24 (Death+heliotropism+apical dominance+change in leadership.)

を考慮することが、1.で述べたような種々の自然な樹形を生成する上で有効であることが確認できた。更に、これらの性質が「植物ホルモン」によりうまく制御されたことも確認した。

最後に、図 25 に本モデルにより生成した樹木を用いて作成した CG 画像の例を示しておく。

なお、計算時間は NEWS NWS-3260 (17 MIPS) を用いて、例えば、図 21(2)(c)の樹形を生成するのに約 11 分要している。

5. む す び

本論文では、リアルな樹木の生成には自然な枝振りが必要であることを述べ、そのために向日性、頂芽優性、休眠打破および枝の幹化を考慮したシミュレーション法が有効であることを、種々のシミュレーション例により示した。また、これらの性質はある種の植物ホルモンの存在を仮定すると、「指令塔」を必要としない生長モデルで実現できることを示した。

なお、枝の幹化における幹化の表現として、反重力方向に生長しようとする性質である負の重力屈性と同様の効果を導入したが、この性質は幹に限らず全ての生長枝が多かれ少なかれもっている性質である⁽²⁶⁾。また、今回のモデルでは、頂芽優性の効果を表すために二つの分枝角 θ_1 と θ_2 の異なる分枝パターンを基本モデルとしたことが、更に負の重力屈性を導入することにより、より幹の流れが明確な樹形が得られると考えら



図 25 生成された樹木の陰影画像
Fig. 25 A shaded image of a generated tree.

れる。この点については、負の重力屈性の樹形に対する効果を広く検討する中で明らかにしていくつもりである。

また、これまでは考慮した性質の効果を明らかにするために、複雑なモデルを生成することを避けているが、性質の経時変化を考慮することもよりリアルな樹形の経年変化の表現のシミュレーションには重要となると考えている。

今後の課題としては、更に

- 幹の根もと付近での枝の枯れ上り現象の表現
- 季節変化を表現するための葉や花の表現
- 樹皮の表現

・風による揺らぎの表現⁽¹⁾

・枝折れの痕を包含するような枝の太さの定義法等が大切であると思われる。

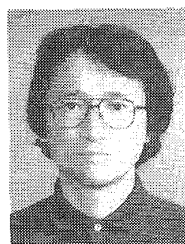
謝辞 有益な御討論を頂いた北海道林業試験場の鈴木梯司氏、佐藤創氏および北海道工業試験場の大崎恵一氏に感謝します。また、在学中、生長モデルの初期版の開発に協力して頂いた東北大学大学院修了生金丸直義君(現在、NTT(株))と岩手大学大学院修了生高橋清明君(現在、富士通(株))に感謝します。また、日ごろお手伝い頂く本学技官那須川徳博氏に感謝します。なお、本研究の一部は、文部省科研費(一般研究(B)04452315)の補助による。

文 献

- (1) 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”, 情処・研究報告, 92-CG-59.
- (2) 千葉則茂: “樹木・草木の生成に関する研究動向”, 情処研究報告, pp. 81-86 (1989).
- (3) 大野義夫: “植物を対象とするCG技術の研究動向”, グラフィクスとCAD, pp. 13-18 (1991).
- (4) Gardner G. Y.: “Simulation of Natural Scenes Using Textured Quadric Surfaces, Computer Graphics”, 18, 3, pp. 11-20 (1984).
- (5) 田北 晋, 西田友是, 中前栄八郎: “リフレクションマッピングを考慮した3次元画像の合成法”, 情処学会第35回全国大会, pp. 2303-2304 (1987).
- (6) 秋葉澄伸, 山本 強, 青木由直: “都市景観デザインへのテスクチャマッピング技法の応用”, NICOGRAPH 論文コンテスト, pp. 245-252 (1987).
- (7) Takita S., Kaneda K., Iriyama H., Nakamae E. and Nishita T.: “A Simple Method for Rendering Penumbrae Caused by Sunlight, Visual Computer, 7, 5-6, pp. 259-268 (1991).
- (8) 出原栄一: “コンピュータによる樹木の成長シミュレーション”, 数理科学, 132, pp. 34-38 (1974).
- (9) 本多久夫: “樹木の分枝”, 数理科学, 221, pp. 78-85 (1981).
- (10) Aono M. and Kunii T. L.: “Botanical Tree Image Generation”, IEEE CG&A, pp. 10-34 (1984).
- (11) Smith A. R.: “Plants, Fractals, and Formal Languages”, Computer Graphics, 18, 3, pp. 1-10 (1984).
- (12) Oppenheimer P. E.: “Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees”, Computer Graphics, 20, 4, pp. 55-64 (1986).
- (13) Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. and Hanan J.: “Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes”, Computer Graphics, 22, 1, pp. 141-150 (1988).
- (14) Reffye P., Edelin C., Francon J., Jaeger M. and Puech C.: “Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development”, Computer Graphics, 22, 4, pp. 151-158 (1988).
- (15) Reffye P., Dinouard P. and Jaeger M.: “Basic Concept

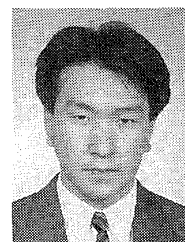
of Computer Plants Growth Simulation”, NICOGRAPH, pp. 21-36 (1990).

- (16) 本多久夫: “樹木の幾何学模様”, 数理科学, 184, pp. 18-25 (1978).
 - (17) 本多久夫: “樹木の三次元モデル”: Sci. From1 (1), pp. 85-94 (1985).
 - (18) 石井啓資, 千葉則茂, 斎藤伸自: “自然の画像生成—木の手続き的形状定義法”, グラフィクスとCAD研究会, 21-5 (1986).
 - (19) 奥村昭雄, 小川真樹: “光天球の中で生長する樹形—1”, Sci. From2 (1), pp. 59-88 (1986).
 - (20) 金丸直義, 千葉則茂, 斎藤伸自: “CGのための樹木の生長モデル”, NICOGRAPH 論文コンテスト, 4, pp. 30-38 (1988).
 - (21) 中嶋正之, 福田智美, 安居院猛: “景観表示のための樹木の生成手法”, NICOGRAPH 論文コンテスト, 4, pp. 22-29 (1988).
 - (22) 金丸直義, 千葉則茂, 高橋清明, 斎藤伸自: “向日性による樹木の自然な枝振りのCGシミュレーション”, 信学論(D-II), J75-D-II, 1, pp. 76-85 (1992-01).
 - (23) 斎藤新一郎: “自然と盆栽”, No. 118, pp. 118-121, No. 119, pp. 63-68, No. 120, pp. 88-92, No. 121, pp. 112-115, No. 122, pp. 78-82, No. 123, pp. 69-73, No. 124, pp. 56-60 (1980).
 - (24) 桜井英博, 清水 碩: “植物生理学入門”, 培風館(1980).
 - (25) 小西国義: “植物の生長と発育”, 養賢堂(1982).
 - (26) Wareing P. F. and Phillips I. D. J. (古谷雅樹監訳): “Growth & Differentiation in Plants (植物の生成と分化(上・下))”, 学会出版センター(1983).
- (平成4年12月28日受付, 5年3月24日再受付)



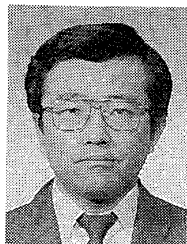
千葉 則茂

昭50岩手大・工・電気卒。同年より昭53まで(株)日本ビジネスコンサルタント(現(株)日立情報システムズ)に勤務。昭59東北大学大学院博士後期課程了。工博。同年同大・工・助手。昭61仙台電波高専・助教授。昭62岩手大・工・助教授。平3同教授。アルゴリズム、コンピュータグラフィクス、形の科学に興味をもつ。情報処理学会、形の科学会、ACM各会員。著書:「Planar Graphs: Theory and Algorithms」(共著, North-Holland, 1998), 「離散数学」(共著, 朝倉書店, 1989), 「レイトレーシングCG入門」(共著, サイエンス社, 1990)など。



大川 俊一

平3岩手大・工・情報卒。平5同大学院修士課程了。現在、NTT(株)。在学中、コンピュータグラフィクスの研究に従事。

**村岡 一信**

昭51 東北工大・電子卒。同年同大研究生。
昭52 仙台電子専門学校教員。平1 岩手県立
盛岡短期大学講師。平3 同助教授。現在に至
る。コンピュータグラフィックスの研究に従
事。共著書「レイトレーシングCG入門」(サ
イエンス社)。情報処理学会会員。

**三浦 守**

昭37 岩手大・工・電気卒。同年東北大・工・
助手。昭43 秋田工業高専助教授。昭47 岩手
大・工・助教授を経て。昭60 同大教授。工博。
この間、マグネティックス、デジタル信号
処理方式などに関する研究に従事。平1年10
月より10か月間、ウィンザ大(カナダ)および
カリフォルニア大サンタバーバラ校(米国)の客員研究員。電気学
会、計測自動制御学会、IEEE、情報処理学会、日本ME学会各
会員。