

## 潜伏芽と力枝を考慮した樹木の生長モデル

金丸直義<sup>†</sup> 高橋清明<sup>††</sup> 千葉則茂<sup>††</sup> 斎藤伸自<sup>†</sup>

<sup>†</sup>東北大学      <sup>††</sup>岩手大学

コンピュータグラフィクスにおける樹木の画像生成は、造園設計や建設計画に応用を持つ重要な課題である。樹形の経年変化、特に老木のような複雑な印象を持つ樹形の生成には枝先の分枝のみならず、古い幹や枝で行われる潜伏芽の発芽のシミュレーションが重要となる。本報告では、植物ホルモンの存在を仮定することによって、潜伏芽の発芽を制御する方法と、枝の寿命を決定することによって、針葉樹に見られる、力枝が幹の伸長に伴って上昇してゆく樹形を生成する方法について述べ、シミュレーション例を示す。

### A GROWTH MODEL OF BOTANICAL TREES HAVING THE ABILITIES TO SIMULATE DORMANCY BREAK AND ACTIVE BOUGHS

Naoyoshi Kanamaru<sup>†</sup> Kiyooki Takahashi<sup>††</sup> Norishige Chiba<sup>††</sup> Nobuji Saito<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Tohoku University      <sup>††</sup>Iwate University

<sup>†</sup>Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai-shi, 980 Japan

<sup>††</sup>4-3-5, Ueda, Morioka-shi, 980 Japan

Realistic image synthesis of botanical trees has many applications. Since generation of "tree skeletons" having natural visual impressions is essential to the realistic image synthesis, various modeling methods of skeletons, especially growth models, have been presented. However, no one has succeeded in simulating natural tree features which appear in a growth process, such as germination of dormant buds and active bough. This paper shows that a growth model having the abilities to realize dormancy break and active boughs, is effective in the CG simulation of realistic tree skeletons.

## 1. まえがき

コンピュータグラフィクスによる樹木の画像生成手法には以下のような能力が期待されよう。

- (1) 3次元形状モデルを生成できること。
- (2) 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。
- (3) 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。

(1) は自由な視点の移動や、風によるゆらぎの表現に重要であり、(2) と (3) はリアルで自然な印象をもつ樹木の表現に重要である。また、自然な印象をもつ“樹木らしさ”の表現、すなわち特に(2)のそれぞれの樹種に属する多様な樹形の表現や(3)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<sup>(1),(3),(10)~(14)</sup>の生長シミュレーションのみならず、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、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が<sup>(6)~(9)</sup>、基本的には得られる樹形は枯死のない分枝による樹形の部分形状となっている。そのため、自然によく見られるような、密集しながらも互いに枯死を避けるように、あたかも互いに交信し合うかのように、うまく空間へと広がりながら伸びる枝振り（樹冠の形成）、あるいは光を求めて生長した軌跡のような枝振り（受光量不足による枝垂れ）、障害物の除去などによる光環境の好転に伴い、樹冠を再生するように伸びる枝振り（樹冠の再生）さらに、古くなった幹からの発芽や剪定後に起こる大量の発芽による樹形の複雑化（潜伏芽の発芽（休眠打破））などは得られていない。

筆者らは以前、このような自然な枝振りが、枝先の向日性の存在を仮定することにより実現できること報告した<sup>(8)</sup>。本報告では、おもに生長抑制・促進ホルモンを仮定し、休眠打破を行うことにより、樹形が複雑になる様子と剪定後の発芽が

発生する様子が実現できることを示す。さらに、枝ごとの寿命を設定し、寿命をすぎた枝を枯れさせるような“シナリオ”を与えることにより、針葉樹にみられるような力枝をもった樹形が生成できることと、枯れ枝の残存期間を設定することによって、枯れ枝が幹から徐々に落ちる様子も実現できることを示す。

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、が必要とされるが、本報告は最も基本的な骨格形状の定義に関するものであり、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枝振りの表現に関するものである。

## 2. これまでの生長モデルと自然な枝振りと複雑化

これまでもいくつかの生長モデルが提案されてきている。これらは大きく、

- (1) 環境との対話性のないもの<sup>(1)~(5),(10)~(14)</sup>と
- (2) 環境との対話性をもつもの<sup>(6)~(9)</sup>とに分けられる。

(1)の環境との対話性のないものでは、枝振りは主に分枝角度と枝の長さ（必要ならば、時間の関数として定義される）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、前章で述べたような自然な枝振りや発芽は生成されない。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。

これに対して、(2)の環境との対話性のあるものとしては、受光量の大小に基づいて枝折れを行うモデルが提案されている<sup>(6)~(9)</sup>。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、より自然な枝の分布が得られている。

しかし、生成される樹形は、基本となっている分枝パターンに強く依存するため、良好な分枝パターンを生成するシナリオが必要となる。そのため、これらのモデルでも、前章で述べたような自然な枝振りや発芽は得られていない。

筆者らは、これに対して枝先の向日性を仮定することにより、より自然な枝振りが生成可能な生長モデルを提案した<sup>(8)</sup>。

ここで、本報告で扱う樹形の複雑化に重要となる休眠打破について少し説明しておく。

### ・休眠打破

ある程度長い間生きている樹木では、先端の若い枝からの他に、古い幹からの分枝も見られる。また、剪定を加えた後にも幹からの発芽がみられる。このように、幹のあちこちにはまだ発芽していない“潜伏芽”と呼ばれる芽が存在し、ある特定の条件下になったときこの潜伏芽（の一部）は発芽する。

このような幹からの発芽は、複雑な樹形を生成するための重要な要素と考えられる。また、剪定後の樹形を表現する場合にも重要である。

これまでの生長モデルにはこのような潜伏芽の考えはない。

## 3. 生長ホルモンによる潜伏芽の制御

古い幹や枝で行われる潜伏芽の発芽は、枝先だけの分枝では得られない、桜の老木のような複雑な樹形の生成に重要である。この潜伏芽の発芽は自然の樹形においてごく一般的に見うけられ、樹形の視覚的印象に与える影響も大きい。

植物はその生長を制御するのに、植物ホルモンと呼ばれるものを生成することによっておこなっていると考えられている。そこで、生長点で生長を抑制する植物ホルモン（生長抑制ホルモン）を生成し、根で生長を促進するホルモン（生長促進ホルモン）を生成していると仮定する（図1）。

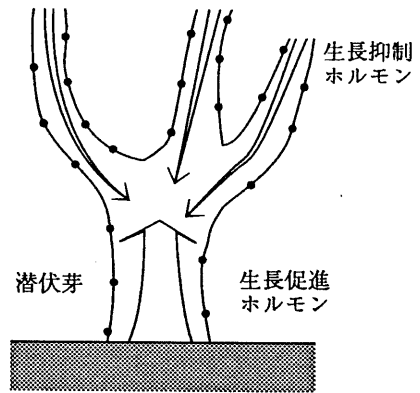


図1 生長ホルモン

生長点で生成されるホルモン 30  
各枝で消失するホルモン 10  
の場合

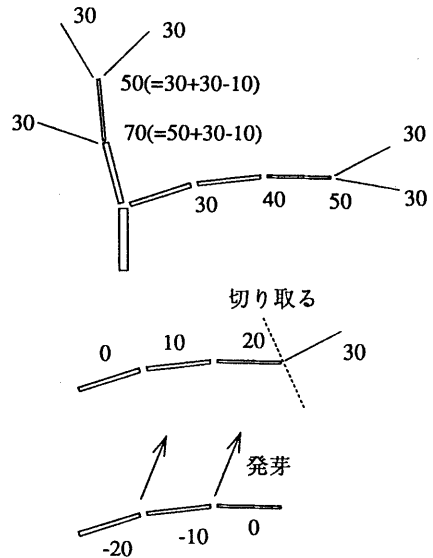


図2 生長抑制ホルモンの計算

このような生長ホルモンは枝を通して伝搬され、その途中で少しずつ失われる。また、抑制ホルモンは促進ホルモンより優先性があると仮定する。そこで、各節間の抑制ホルモンの量を求めることにより、これがしきい値より少ない場合、促進ホルモンが潜伏芽に働きかけ、休眠打破が行われるとする。抑制ホルモンの量の求め方は、まず

全ての生存している枝の先端（葉がついていると考える）に一定値を与え、根の方向に加算し、途中、節間を通る度に一定値を引いたものである（図2）。

この方法によれば、その子孫に十分に葉をつけている枝では潜伏芽の発芽が抑制され、葉の少ない枝からは発芽が行われる。また、剪定などによる枝折れがあると、そこからの発芽が行われる。

発芽した芽でも受光量を求め、十分な受光量のあるものだけが生き残り、生長を続けることとする。

#### 4. 枝の寿命と枯れ枝の残存期間

針葉樹では樹齢の増加に伴って一次枝が枯れ上がる様子が観察される。力枝の存在は樹木の生長につれ、下枝が枯れ落ちていき、樹冠の下部で力強く存在する枝（力枝）が、次第に高くなるという生長の印象に重要である（一度固くなった幹は伸びることはないことに注意されたい）。

また、枯れた枝も直ちに落ちるのではなく、ある程度の期間は幹または枝に付着している。枯れ枝の残存性は樹冠の印象を変えるものではないが、樹木の年齢や生育環境を感じさせるのに効果がある。

このような樹形を生成するために、枝の寿命と枯れ枝の残存期間をモデル化した。一次枝の寿命はその枝が発生した時に決定し、高い所即ち後から発生したものほど寿命が長くなるものとする。

また、枯れ枝の残存期間はその太さに応じて、太いものほど長くするものとする。

#### 5. シミュレーション

本章では、まず向日性の有効性をいくつかの例により示し、次に生長ホルモンの分布に基づいた潜伏芽の配置によって複雑な印象を持った樹形が生成できることを示す。また、枝の生存期間を設定することによって、活性期を過ぎた枝が幹の下から枯れ上がり、力枝を持った樹形が生成できることを示す。最後に、ここで枯れ枝の残存期間を

設定することによって枯れ枝が幹から落ちていく様子をシミュレーションする。

##### 5.1 向日性による自然な枝振りのシミュレーション

まず、以降のシミュレーションで用いた単純な2分枝モデルを説明しておく。

単純2分枝モデルでは、鉛直上向きの1本の枝を初期形状とし、枝の先端に2本の枝を繰り返し付け加えることにより完全2分木構造をつくりあげている。ある世代において、その時点で生存している全ての先端の枝に以下の規則で2本の枝を付け加える（図3参照）。まず、親枝を含みその最大傾斜方向が親枝の向きと一致する平面（分枝平面）を考え、次に2つの子枝をこの分枝平面上にあり、かつ親枝の延長線と一定の角度（分枝角）であり、ここでは $10^\circ$ とした）をなすように置く。この分枝規則を繰り返し適用すると、図4に示すようなすりばち状の“幾何学的”な樹形が生成される。

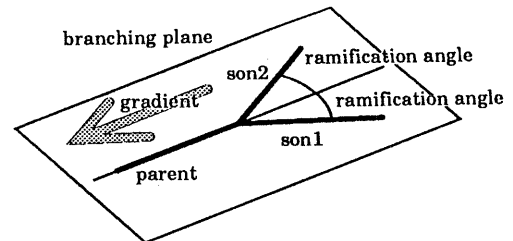


図3 単純2分枝モデルの分枝パターン

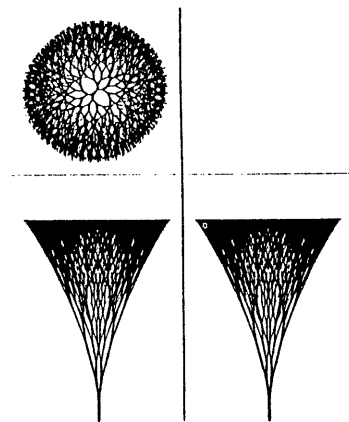


図4 単純2分枝モデルによる樹形

単純2分枝モデルで受光量に基づいて枝折れを行った例を図5(a)に示す。(a)では、枝の混雑が避けられているが、向日性がないため枝折れのない単純2分枝モデルの部分形状となっている。

図5(b)には、枝の枯死と向日性を組み込んで得られた例を示す。向日性により、枝垂れが現れてくる。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(b)を比較すると、(b)の方では枝先端の分布がうまく広がっていることが確認できる。

## 5.2 潜伏芽の発芽のシミュレーション

本節では、潜伏芽の発芽のシミュレーションを示す。

図5(b)と同一のパラメタ値で潜伏芽の発芽を行った例を図6に示す。潜伏芽を考慮することによって、老木のような複雑な印象をもった枝振りが生成できていることが確認できる。特に、根本付近ではケヤキの街路樹にみられるような潜伏

芽から生長した枝が幹のまわりに生き残っている様子が確認できる。潜伏芽の初期方向はランダムに与えているが、向日性によって方向が修正され、木全体としては丸みを帯びた樹冠が形成されていることがわかる。

次に、剪定や風などの外的な要因による枝折れを受けた場合の潜伏芽の効果について述べる。図7は受光量不足による枝折れに加えて、ランダムな枝折れを行った場合の潜伏芽の発芽のシミュレーション例である。図7では、ランダムな枝折れによって空間の隙間ができた部分に潜伏芽による枝が回り込んで、樹冠を修復しようとしている様子が観察できる。

なお、今回は簡単のため枝折れがランダムに生じるとしてシミュレーションを行ったが、街路樹などの人為的な剪定では、なんらかのルールによって剪定する枝を選択しているものと考えられる。このような剪定をうけたときの、樹形の変化のシミュレーションも興味深い。

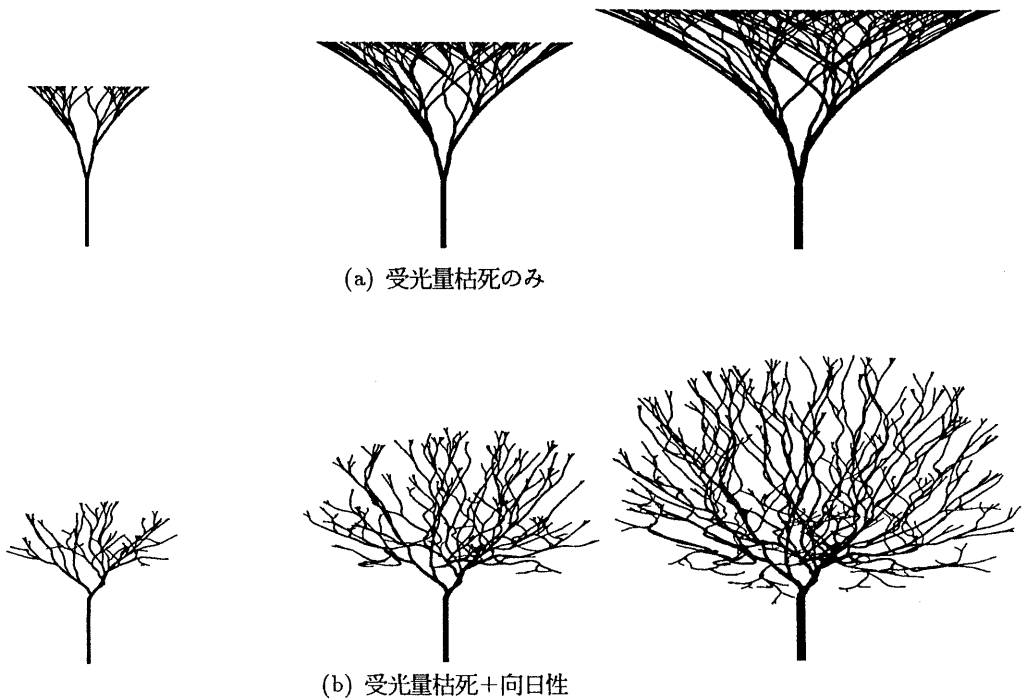


図5 向日性による枝振りのシミュレーション

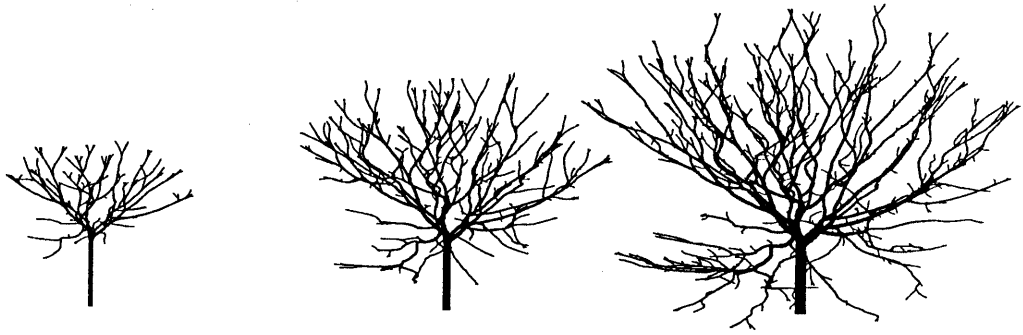


図6 潜伏芽の発芽のシミュレーション (受光量枯死+向日性+潜伏芽)

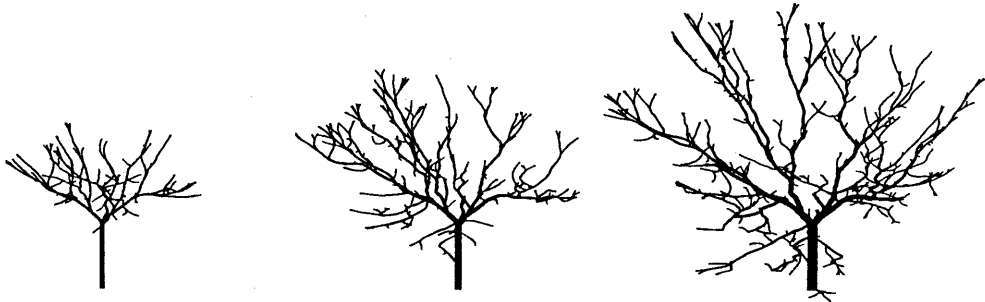


図7 潜伏芽の発芽のシミュレーション (受光量枯死+向日性+潜伏芽+ランダム枝折れ)

### 5.3 力枝のシミュレーション

ここでは、針葉樹のような主軸を持った分枝パターンに基づいて、力枝のある樹形の生成例を示す。

図8 (a) は力枝のない即ち枝の寿命を考慮しない樹形の例である。(a) では、初期に生じた幹の低い部分での一次枝が最後まで伸び続けており、不自然な印象を受ける。図8 (b) では一次枝の寿命は発生した時期によらずに一定値とした例である。この例では一次枝はいずれも一定の期間生存した後で枯れ落ちてしまうため、定まった大きさの樹冠が生長に従って幹を昇ってゆくような樹形となる。図8 (c) では、後から発生した一次枝ほど寿命が長くなるとした例である。(c) では、生長に従って徐々に樹冠が大きくなってゆく。実際の樹木では、(c) の寿命の与え方がふさわしいと考えられる。

図8 (b), (c) では、寿命をすぎた枝 (枯れ枝) はすべて除去しているが、図9 では枝の太さに応じて枯れ枝を残存させた例を示す。図9 (a) から (c) の順に残存期間を長くとしている。

著者らは以前、樹木を群生させ他の木の葉の影も考慮した受光量計算によっても下枝が枯れ落ちる樹形が生成できることを示したが<sup>(7)</sup>、実際の樹木では後天的な受光量と先天的な寿命の両者が枝枯れに関係しているものと考えられる。孤立した環境でもある程度は下枝が枯れ落ち、群生した時にはより枯れやすくなるように、2つの要因を融合したモデルへの拡張が必要である。

本報告での力枝のモデルは針葉樹の分枝パターンに限定したものであるが、広葉樹たとえばケヤキなどの二又の分枝パターンを持つ樹種でも、幼木のころは側方分枝に近い分枝パターンを持っているように思われる。これは、幼木では十分な樹

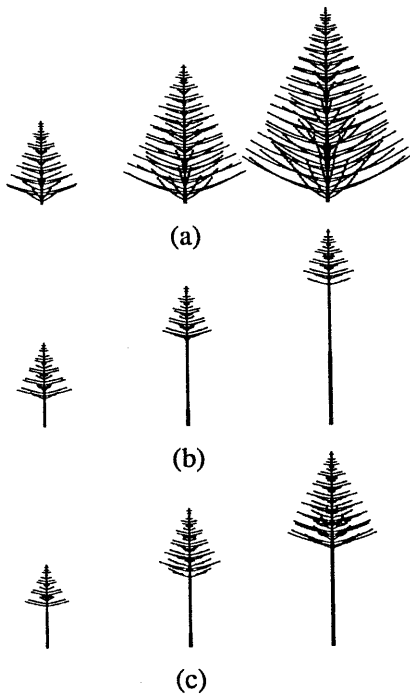


図8 力枝のシミュレーション

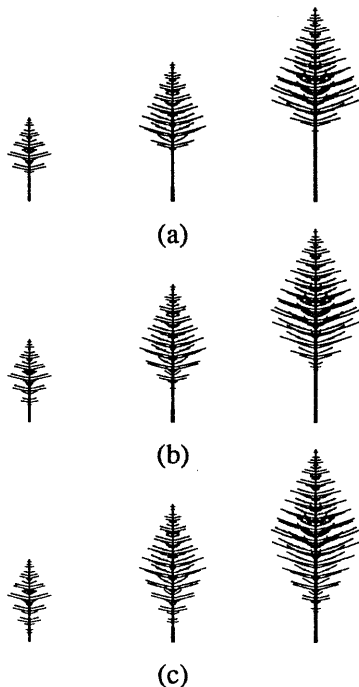


図9 枯れ枝の残存期間のシミュレーション

高を確保するためには、まず幹のような枝を立て、側枝はたとえ受光量が十分であっても生長を止めた方が有利であるからだと推測できる。従って、力枝のモデルは広葉樹の特に幼木での生長規則に拡張することが重要であると考えられる。

最後に、本論文の方法から得られた骨格形状を用いたCG画像の例(図10)を示す。CG画像により向日性を組み込んで得られた枝振りと、潜伏芽の発芽による枝振りがさらに確認できよう。

## 6. むすび

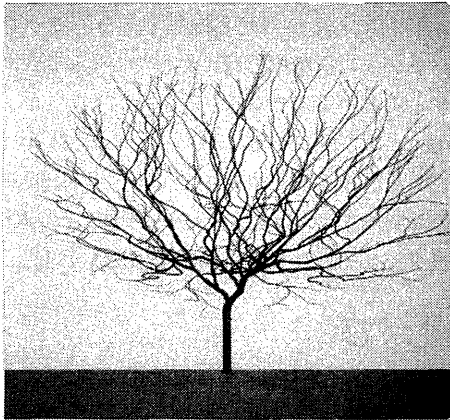
本論文では、樹木のリアルなCG画像の生成のための樹木の生長モデルには向日性の能力を組み込むことが有効であることを示した。すなわち、丸みを帯びた樹冠の形成、受光量不足による枝垂れ、を実現する枝振りをもった樹形を安定に生成するためには、環境との対話性、すなわち受光量不足による枝の枯死と枝先の向日性による空間探索機能をもった生長モデルが有効であることを示した。

次に、樹形の経年変化、特に老木のような複雑な印象をもつ樹形を得るためには、向日性による自然な枝振りのシミュレーションに加え、潜伏芽の発芽、枝の活性期と力枝の存在、枯れ枝の残存性のシミュレーションが重要となることを述べ、シミュレーション例によってこれらの効果を示した。

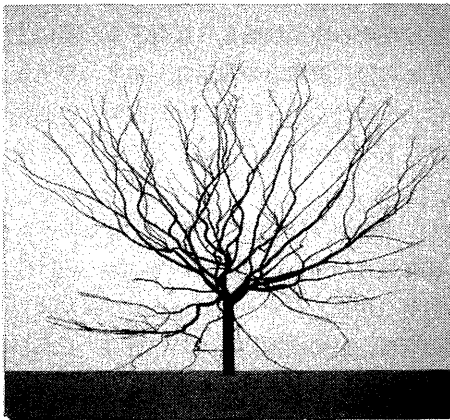
また、このように、力枝を考慮すれば、自然な生長の印象が得られ、前述のシミュレーション例で根本の枝を他の枝より長くするというようなことは不要になる。今後はこれらの点について検討を深める予定である。

さらに、葉の生成や、樹皮の生成も重要であることはもちろんである。

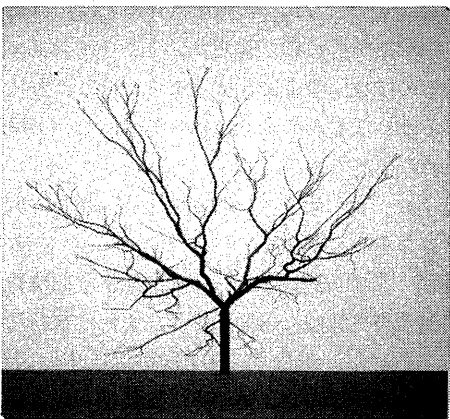
謝辞 日頃御討論頂く、東北大学工学部情報工学科西関隆夫教授に感謝します。また、有益な御討論を頂いた、北海道立林業試験場鈴木悌司氏、佐藤創氏、北海道立工業試験場大崎恵一氏に感謝します。



受光量枯死+向日性



受光量枯死+向日性+潜伏芽



受光量枯死+向日性+潜伏芽+ランダム枝折れ

図 10 画像生成例

文献

- (1) 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(1974-6).
- (2) 本多久夫: “樹木の幾何学模型”, 数理科学, 184, pp.18-25(1978-10).
- (3) 本多久夫: “樹木の分枝”, 数理科学, 221, pp.78-85(1981-11).
- (4) 本多久夫: “樹形の三次元モデル”, Sci. Form 1(1), pp.85-94(1985).
- (5) 石井啓資, 千葉則茂, 斎藤伸白: “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).
- (6) 奥村昭雄, 小川真樹: “光天球の中で生長する樹形-1-”, Sci. Form 2(1), pp.59-88(1986).
- (7) 金丸直義, 千葉則茂, 斎藤伸白: “CGのための樹木の生長モデル”, NICOGRAPHI 論文コンテスト, 4, pp.30-38(1988).
- (8) 金丸直義, 高橋清明, 千葉則茂, 斎藤伸白: “向日性による樹木の自然な枝振りのシミュレーション”, グラフィクスとCADシンポジウム, pp.167-175(1990).
- (9) 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”, 情処論, 32, 5, pp.618-625(1991).
- (10) M.Aono and T.L.Kunii: “Botanical Tree Image Generation”, IEEE CG&A, pp.10-34(May 1984).
- (11) A.R.Smith: “Plants, Fractals, and Formal Languages”, Computer Graphics, 18, 3, pp.1-10(July 1984).
- (12) P.E.Oppenheimer: “Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees”, Computer Graphics, 20, 4, pp.55-64(1986).
- (13) P.Prusinkiewicz, A.Lindenmayer and J.Hanan: “Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes”, Computer Graphics, 22, 4, pp.141-150(Aug. 1988).
- (14) P.Reffye, C.Edelin, J.Francon, M.Jaeger, C.Puech: “Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development”, Computer Graphics, 22, 4, pp.151-158(Aug. 1988).