

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

非会員 金丸 直義<sup>†</sup>      正 員 千葉 則茂<sup>††</sup>  
 非会員 高橋 清明<sup>††</sup>    正 員 齋藤 伸自<sup>†</sup>

CG Simulation of Natural Shapes of Botanical Trees Based on Heliotropism

Naoyoshi KANAMARU<sup>†</sup>, *Nonmember*, Norishige CHIBA<sup>††</sup>, *Member*,  
 Kiyooki TAKAHASHI<sup>††</sup>, *Nonmember and* Nobuji SAITO<sup>†</sup>, *Member*

あらまし 樹木のリアルな CG 画像の生成は、種々の建設計画のための景観シミュレーションや、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重要な応用をもつ。リアルな樹木の CG 画像の生成には、まずその自然な印象をもつ骨格形状を得ることが重要であり、これまでもそのための生長モデルが活発に研究されてきている。しかしながら、これまでに提案されている、遺伝的に定まるような分枝パターンを与える生長モデルのみでは自然な樹形、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、樹冠の再生を実現するような枝振りをもった樹形は得られない。本論文では、まずこのような自然な樹形を安定に得るためには、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考慮した生長モデルが有効であることをシミュレーション例により示す。次に、モデルのもつパラメータと樹形の関係を明らかにする。最後に、樹形の経年変化、特に老木のような複雑な樹形のシミュレーションを可能とするための今後の課題について述べる。

キーワード：画像生成、樹木、生長モデル、向日性

1. ま え が き

樹木の画像生成は、自然景観の CG 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、街路樹の並木などの種々の建設計画のための景観シミュレーションや、ヘリコプターなどの低速低空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用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期待される。そのため、生成手法には以下のような能力が期待される。

- (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、風による揺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。これまでの樹木や草本の表現法は、手続きの形状定義法により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ス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が、今後はますます前者の手法に関する研究が重要となろう。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の生長シミュレーション<sup>(1),(3),(9)-(13)</sup>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)-(8)</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

<sup>†</sup> 東北大学工学部通信工学科, 仙台市  
 Faculty of Engineering, Tohoku University, Sendai-shi, 980 Japan  
<sup>††</sup> 岩手大学工学部情報工学科, 盛岡市  
 Faculty of Engineering, Iwate University, Morioka-shi, 020 Japan

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)、更に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)などは得られていない。

本論文では、まず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をいくつかのシミュレーション例により示す。これは、枝先が向日性をもてば、枝自身が樹木全体における位置や「役割」を意識することなく「勝手」に生長するだけで、全体としての樹形が安定して生成され得ることを示すことにもなる。次に、モデルのもつパラメータと生成される樹形の関係を明らかにする。最後に、より自然な樹形を得るための今後の課題について述べる。

なお、これまでにこのような向日性により自然な樹形を形成しようという試みはない。蔓性と呼ばれる要因を考慮したモデルは提案されているが<sup>(6)</sup>、樹形全体の形成に影響を与えるものではない。

また、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、本論文は最も基本的な骨格形状の定義に関するものである。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枝振りの表現に関するものであることを強調しておく。

## 2. これまでの生長モデルと自然な枝振り

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),(9)~(13)</sup>と
- (2) 環境との対話性をもつもの<sup>(6)~(8)</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1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)~(8)</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は得られていない。

ここでこの「自然な枝振り」についてももう少し詳しく説明しておく。

### (a) 樹冠の形成

図1は、普通に生長していた樹木が、ある時点で幹と一部の太い枝を残してせん定され、その後しばらくの期間、生長を続けて得られた樹形を示している。太い枝の表面いたるところから発芽が見られるが、発芽した枝の初期方向は全くランダムであるように見える。

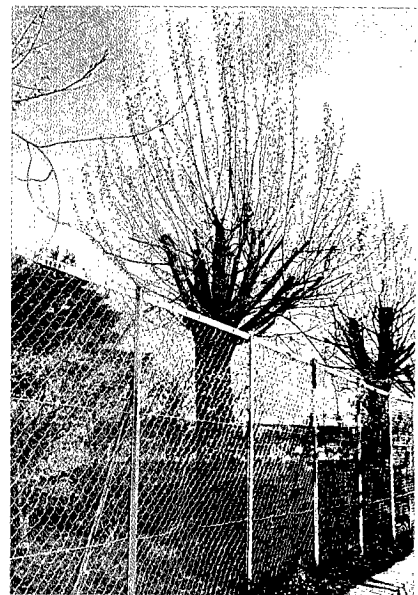


図1 丸みを帯びた樹冠  
Fig. 1 A round tree crown.



図2 枝垂れ枝  
Fig. 2 Weeping boughs.

しかし、各枝は自分自身の空間的位置を知っているかのように、中心部分の枝は上向きに、周辺部分の枝は混雑を避けるかのように横または下向きにいったん伸びてから、やがて先端を上に向けて伸び、丸みを帯びた自然な樹冠を形成している。

このような状況では、従来のモデルでは分枝規則における親枝に相当するものがなく、子枝の初期方向をいかに決定してよいかわからない。

(b) 受光量不足による枝垂れ

図2の左下の枝のように、横若しくは地面に向かうように伸びてから、先端付近では上を向くような枝振りがよく見受けられる。すなわち、受光量の少ない枝(後で発芽した枝に多い)が地面方向に光を求めて生長した結果得られた「枝垂れ」形状であると考えられる。

これまで枝の自重による枝垂れを考慮したモデルが提案されているが<sup>(6),(7)</sup>すべての枝に均一に枝垂れが生じるため、図2のように選択的に発生する枝垂れ形状を表現することはできない。

(c) 樹冠の再生

自然の樹形を観察すると、せん定、虫害等によって大きく枝が刈り取られた場合、隣に植えられていた木が切り倒された場合など、樹木を取り巻く光環境が大きく変化して、空間に光を受けることのできる領域が新たに確保されたときには、周囲の枝がその空間を目指して吸い込まれるかのように伸び、やがて何事もなかったかのように樹冠を再生してしまう。

これまでの生長モデルにはこのような再生能力はない。

以上のような樹形は、分枝パターンに主眼を置いた分枝規則や、受光量に基づく枝折れのみでは表現する

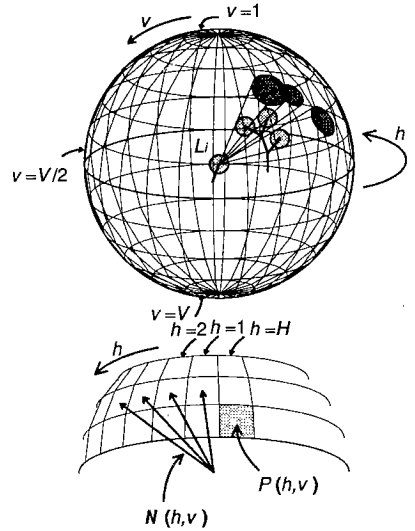


図3 天球への葉球の影の投影

Fig. 3 Shadows of leaf-balls cast upon the celestial sphere.

ことは不可能である。このような樹形が生成される理由は、枝の先端が何らかの方法によって枝の空間的な混雑度を「知覚」し、それに「対応」して生長しているためであると考えられる。筆者らは、それは枝先の向日性によるものであるという仮定をおき、その有効性を確認した。

3. 向日性を考慮した生長モデル

これまでの受光量を考慮した生長モデルでは、鉛直上方向からの光<sup>(8)</sup>や、水平面から上の半球方向からの光<sup>(6),(7)</sup>について受光量を求め、これをあらかじめ設定されたしきい値(枯死しきい値と呼ぶ)と比較することによってその枝の枯死、生存を決定している。ここでは、水平面から下の半球も含めて、葉の周囲全方向からの光を考慮することとした。これは、自然の樹木の観察により、地面からの照返し(間接光)も無視できないと考えられたからである。

本論文では、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という向日性を考慮した樹木の生長モデルを提案する。

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、いずれか一つの方向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は以下のものである。ここでは、一つの枝の葉群を葉球と呼ぶ球で近

似し、 $L_i$ と表す(図3参照)。 $L_i$ を中心とした天球を緯度方向  $V$  個、経度方向  $H$  個に均等に細分化し、細分化して得られるパッチを  $P(h, v)$  ( $h=1, \dots, H, v=1, \dots, V$ ) で表す。 $v=1, \dots, V/2$  は上半球、 $v=V/2+1, \dots, V$  は下半球を表すものとする。

球の中心から、 $P(h, v)$  の中心に向かう単位ベクトルを  $N(h, v)$ 、 $P(h, v)$  の面積を  $S(h, v)$ 、 $P(h, v)$  から球の中心にある  $L_i$  に到達する光の強度を  $B(h, v)$  と書く。ここでは、シミュレーションの条件を単純なものとするため  $B(h, v)$  の初期値  $B_0(h, v)$  は上半球、下半球のそれぞれで、すべてのパッチとも等しいとしている。すなわち、

$$B_0(h, v) = \begin{cases} C_1 & (v=1, \dots, V/2) \\ C_2 & (v=V/2+1, \dots, V) \end{cases}$$

とする。

$L_i$  以外の葉球がないとき、 $L_i$  の受光量は  $\sum_h \sum_v B_0(h, v) S(h, v)$  である。 $L_i$  以外の葉球による影響も考慮して  $L_i$  の受光量を求めるには次のようにする。パッチ  $P(h, v)$  から葉球  $L_i$  に向かう光の一部が  $L_i$  以外の葉球  $L_j$  によって遮られる場合は、その分  $B(h, v)$  を減らさなければならない。すなわち、 $N(h, v)$  を延長した半直線が  $L_j$  と交差をもつときには、 $B(h, v)$  を一定の割合で減じる。これを  $i$  以外のすべての  $j$  について行う。この  $B(h, v)$  に  $S(h, v)$  の重みを付けてすべての  $h, v$  について合計し、 $L_i$  以外の葉球がない場合の受光量で正規化したものを  $L_i$  の受光量と言う。すなわち、

$$L_i \text{ の受光量} = \frac{\sum_h \sum_v B(h, v) S(h, v)}{\sum_h \sum_v B_0(h, v) S(h, v)}$$

である。これらの計算は、 $L_i$  以外のすべての葉球について、その天球  $P(h, v)$  への投影のスキャン変換を求めることにより行える。

また、 $N(h, v)$  に  $B(h, v)$ 、 $S(h, v)$  の重みを付けて合計し、単位ベクトル化したものを受光ベクトルと言う。すなわち、

$$L_i \text{ の受光ベクトル} = \frac{\sum_h \sum_v N(h, v) B(h, v) S(h, v)}{\sum_h \sum_v B(h, v) S(h, v)}$$

である。受光量は葉に到達する光の総量を表し、受光ベクトルは光の到達する平均的な方向を表している。

また、天球の強さを表す  $C_1$  と  $C_2$  の比がパラメータとなるので、この比を光の強度比と呼ぶことにする。

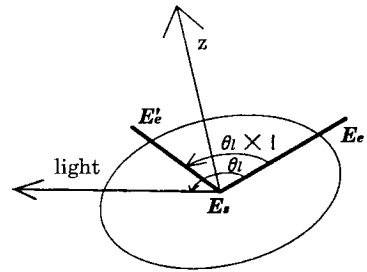


図4 向日性の実現  
Fig. 4 Realization of heliotropism.

すなわち、

$$\text{光の強度比} = \frac{C_1}{C_2}$$

である。

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(図4参照)。枝の始点  $E_s$  を中心に、枝の終点  $E_e$  および受光ベクトルを含む平面上で、 $E_s$  を受光ベクトルの方向へ一定の割合  $I$  (向日性の強さを表す) で回転する。向日性が弱い場合には割合が小さく、強い場合には大きくなる。

#### 4. シミュレーション

本章では、最初に2.で示した自然な枝振りが、向日性を考慮することで表現できることをいくつかの例によって示し、続いてモデルのパラメータと樹形の関係について、シミュレーション例により明らかにする。

##### 4.1 自然な枝振りのシミュレーション

本節では、まず2.で述べた「樹冠の形成」のシミュレーションを示す。次に、向日性を組み込んだ単純な分枝モデルにより、「受光量不足による枝垂れ」と「樹冠の再生」のシミュレーションを示す。

##### (1) 樹冠の形成のシミュレーション

ここでは、図1のような枝振りのシミュレーション例を示す。発芽の位置がランダムに与えられても、その後の枝の生長が自然な樹冠を生成することを示すために、発芽の位置はある大きさの球の内部でランダムに選び、初期方向もランダムとしてシミュレーションを行った。図5は、発芽点を50個とし、50世代(先端に子枝を付け加える繰返し回数、図9参照)までのシミュレーション例である。この例では、発芽時期には多少の時間差があるとして、発芽時期を1~20世代の範囲でランダムに選んでいる。(a)は向日性がない例で

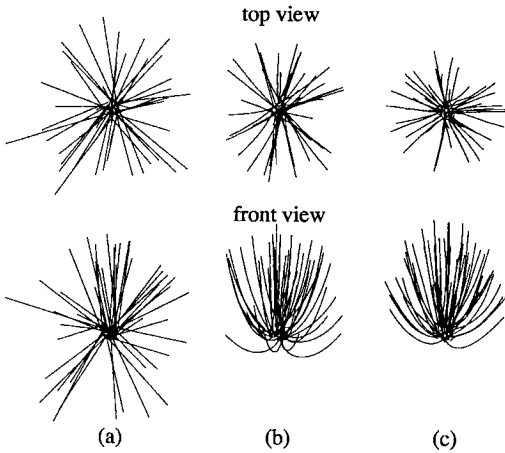


図5 樹冠の形成  
Fig. 5 Formation of a tree crown.

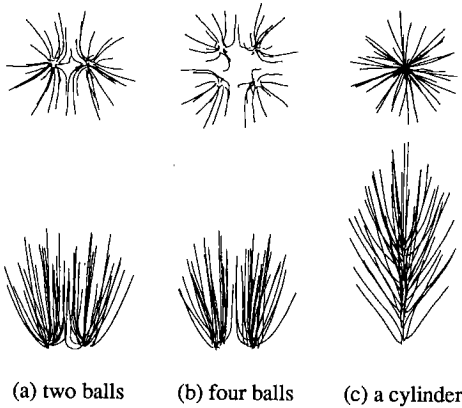


図6 種々の発芽点の分布  
Fig. 6 Various distributions of buds.

あり、枝は初期方向のまま伸びている。(b)、(c)の順に向日性を強くしている。更に、複数の発芽点のかたまりを分布させたシミュレーションを図6(a)、(b)に示す。これらは、複数の樹木の枝同士の干渉や、同一の樹木の枝同士の干渉ともみなせる。また、主軸のみを残して枝がすべて刈り取られ、主軸のいたるところから発芽している状態を想定し、円柱の表面に発芽点を置いた例が図6(c)である。

いずれにしても、全体として丸みを帯びた一つの大きな樹冠を形成していることがわかる。実際の樹木でも複数の株から発生した樹木が一つの樹冠を形成するのがよく観察される。また、幹の周りにふっくらと生えそろう枝や、急斜面(大木の幹にあたる)に並んだ複数の樹木の1本が大木の枝のように生えているのも見

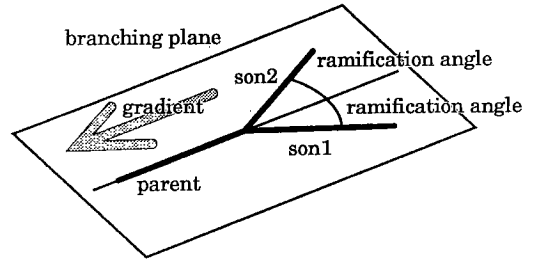


図7 単純2分枝モデルの分枝パターン  
Fig. 7 The ramification of a simple dichotomy model.

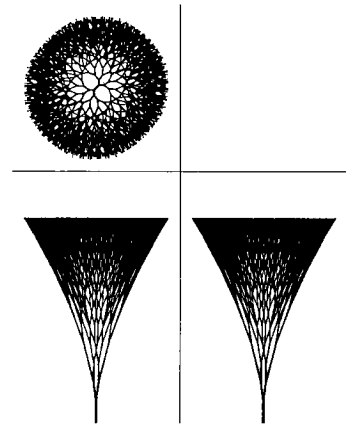


図8 単純2分枝モデルにより生成される樹形  
Fig. 8 The shape of tree generated by a simple dichotomy model.

受けられる。

(2) 受光量不足による枝垂れ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分木構造を作り上げている。ある世代において、その時点で生存しているすべての先端の枝に以下の規則で2本の枝を付け加える(図7参照)。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、次に二つの子枝をこの分枝平面にあり、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)をなすようにおく。この分枝規則を繰り返し適用すると、図8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9に枝の枯死と向日性を組み込んだモデルの処理の流れを示す。但し、ここでは枯死しきい値  $D$  は枝ごとに一定の範囲内でランダムに変えている。すなわち、

$$D \leftarrow D_0 + 0.3 \times \text{random}$$

$D_0$ : 入力パラメータの標準枯死しきい値

random: -1 から 1 の乱数

としている。これは、枯死しきい値を一定値に固定すると、同時に多くの枝の受光量が枯死しきい値未満になることが起きるためである(擬似多色化のランダムディザに似た効果を出している)。定数 0.3 はこの目的に対

**procedure maketree;**

**begin**

{初期設定}

パラメータ値の設定;

{初期形状}

1本の枝を垂直に立てる;

**for** 世代=1 **to** 終了世代 **do**

**begin**

全ての先端の枝に2つの子枝を付ける;

付けられた全ての子枝の受光量, 受光ベクトルを求める;

**for** 全ての子枝 **do**

**if** その枝の受光量 < 枯死しきい値 **then**

**begin**

その子枝を除去;

親枝の2つの子枝が除去された場合は, 親枝も

除去。根本に向かって再帰的に繰り返す

**end**

**else**

その子枝を向日性により回転

**end**

**end;**

図9 向日性をもった単純2分枝モデルの生長規則

Fig. 9 The growth rules of a simple dichotomy model having heliotropism.

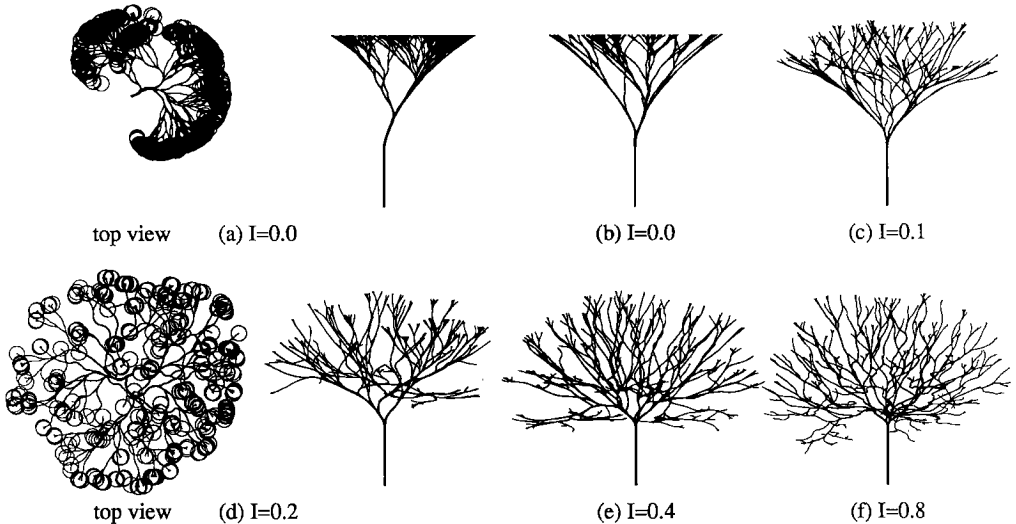


図10 向日性のシミュレーション  
Fig. 10 Simulation of heliotropism.

して経験的に得られた値である。また、図10から図14では根本の枝だけを他の枝の15倍の長さにして

いる。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した例である。向日性が強くなるに従い、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。図では枝先端の分布を示すために、葉球を丸で示している。表1に図10(e)のパラメータ値を示す。図10から図14では、図中に示されていないパラメータ値は表1の値を用いている。

### (3) 樹冠の再生のシミュレーション

図11に、「樹冠の再生」の効果を確認するためのシミュレーション例を示す。まず、初期形状として2本の木を並べて配置する。2本をそのまま25世代まで生長させたものが(a)、60世代まで生長させたものが(b)である。(c)は(b)の右側の木のみを表示したものであ

る。(b), (c)より2本の木が互いに枯死を避けながら、一つの大きな樹冠を形成している様子が確認できる。(d)は(a)の右側の木のみを取り出したものである。(e)は26世代から60世代まで、右側の木のみで生長させた例である。(d)は右方向に偏った枝振りとなっているが、26世代以降は左方向にも光を求めることができるため、(e)では枝を伸ばし樹冠を再生している様子がわかる。

4.2 パラメータと樹形の関係

本節では、向日性の強さ以外のモデルのパラメータ、すなわち葉球の大きさ、枯死しきい値、上半球と下半球の光の強さの割合(光の強度比)を変化させた例を示し、それぞれのパラメータが樹形とどのように関係しているかを示す。

(1) 葉球半径と枯死しきい値

図12は(a)から(c)の順に葉球の半径を小さくしている。葉球が小さければ他の枝に与える影の影響も小さくなるため、枝が込み合っている。図13は(a)から(c)の順に枯死しきい値を小さく、すなわち枝を折れにくくしてシミュレーションした結果である。枯死しきい値が小さくなれば、受光量の少ない枝も生き残ることができるため生き残る枝の本数が増えるが、同時に光を遮られる割合も多くなるため、樹冠の下の方では枝の回り込みが強くなっている。これらより、葉球半径を変えても樹冠の概形(樹貌とも呼ばれる)は変化せず、枝の分布の疎密が変化しただけであることがわかる。一方、枯死しきい値を変えることは、樹冠の形を変えることになることがわかる。すなわち、枯死しきい値の小さなものは、枝が地面を覆い隠すように伸び、「つつじ」などの低木の印象が強いものとなっている。

(2) 光の強度比

図14は光の強度比を変化させたシミュレーション例

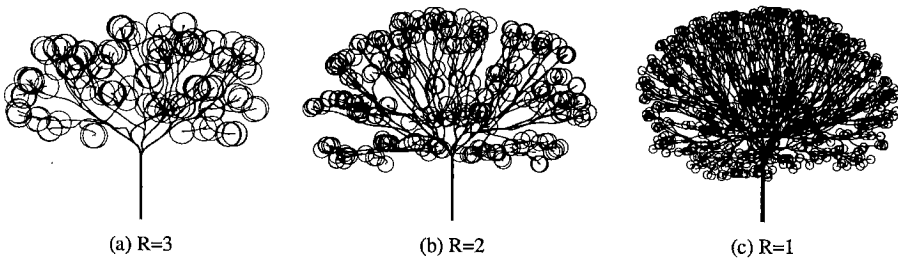


図12 異なる葉球半径に対する樹形  
Fig. 12 Shapes of trees based on different leaf-ball radii.

表1 図10(e)のパラメータ値

パラメータ名	図中の略号	値
世代	G	40
向日性の強さ	I	0.4
葉球の半径(枝の長さを1とする)	R	2
標準枯死しきい値	D	0.6
光の強度比	L	3/2

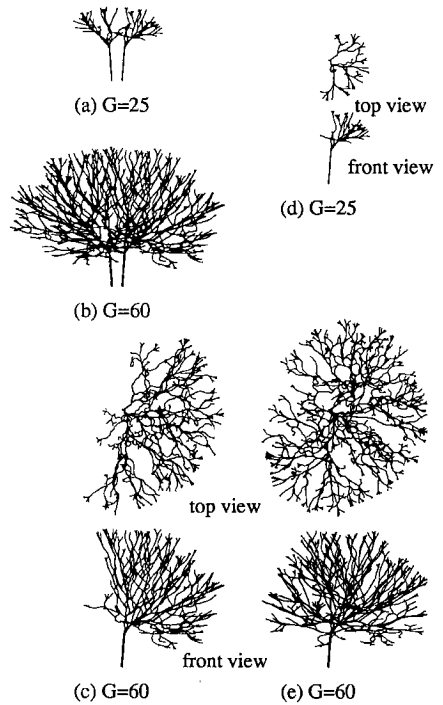


図11 樹冠の再生のシミュレーション  
Fig. 11 Simulation of regeneration of a tree crown.

である。光の強度比が小さければ、下方への枝の回り込みも多くなっている。これは、光環境の違いによる樹形の変化とも見られる。すなわち、地面からの反射光の少ないものは群生したときの樹冠のように、細く高い樹冠を作る。

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15)を示す。(a)は単純2分枝モデルによる例、(b)は受光量不足による枝折れと向日性による例である。CG画像により単純2分枝パターンの不自然さと、向日性を組み込んで得られた枝振りの自然さが更に確認できよう。また、向日性を「針葉樹」の分枝パターンに組み込んだ例(図16)を示す。紙面の都

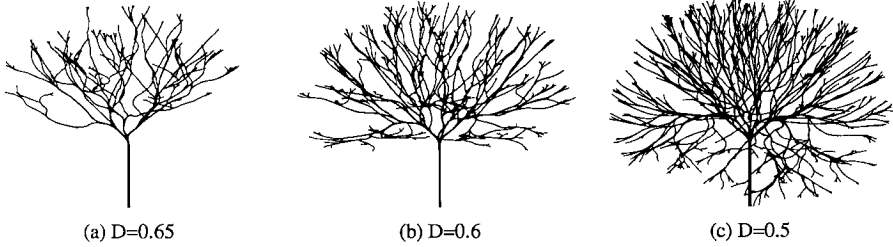


図13 異なる枯死しきい値に対する樹形  
Fig. 13 Shapes of trees based on different thresholds of death.

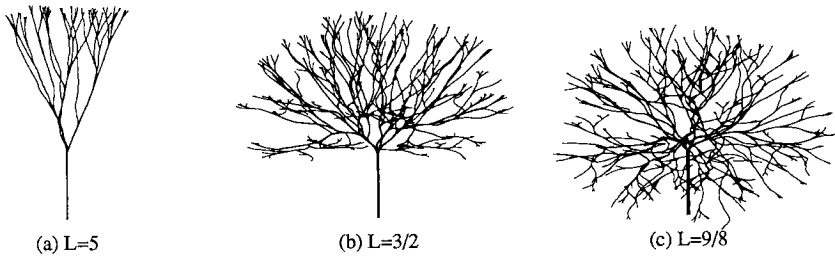
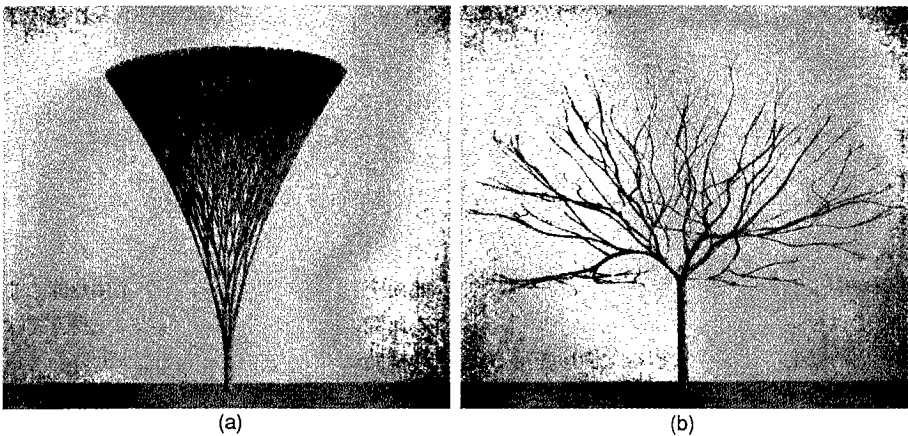


図14 異なる光の強度比に対する樹形  
Fig. 14 Shapes of trees based on different light-intensity-ratios.



(a) The shape of a tree generated by a simple dichotomy model  
(b) The shape of a tree generated by our growth model

図15 陰影画像  
Fig. 15 Shaded images.



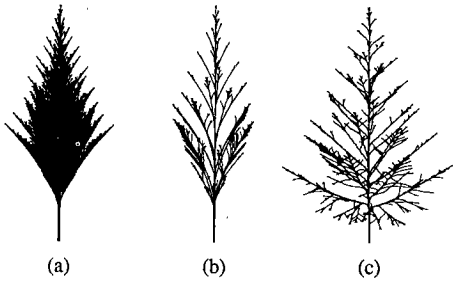


図 16 向日性をもった針葉樹  
Fig. 16 A conifer having heliotropism.

合上この「針葉樹」の分枝モデルの説明は省略するが、向日性の有効性は2分枝モデルに限らないことが確認できる。

これらのシミュレーション例により、枝先が向日性をもてば、枝自身が樹木全体における位置や「役割」を意識することなく「勝手に」生長するだけで、全体として樹形が生成され得ることがわかる。

なお、実験に用いた計算機はSUN4/110、言語はUNIX上のCであり、図15(b)の形状定義に約26分、画像生成に約110分を要した。画像生成はレイトレーシング法を用い、画像サイズは512×512(pixel)で、1pixel当り16倍のオーバーサンプリングを行っている。

## 5. む す び

本論文では、樹木のリアルなCG画像の生成が多くの応用をもつことを述べ、そのために重要となる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、樹冠の再生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。更に、モデルのパラメータ、すなわち葉球の大きさ、枯死しきい値、光の強度比と樹形の関係を明らかにした。

最後に、ここでは今後の課題について述べておく。樹形の経年変化、特に老木のような複雑な樹形を得るためには、今回示した向日性による自然な枝振りのシミュレーションに加え、

- (1) 潜伏芽の発芽、
- (2) 枝の活性期と力枝の存在、
- (3) 枯れ枝の残存性

などのシミュレーションが重要となる。図17に(2)の

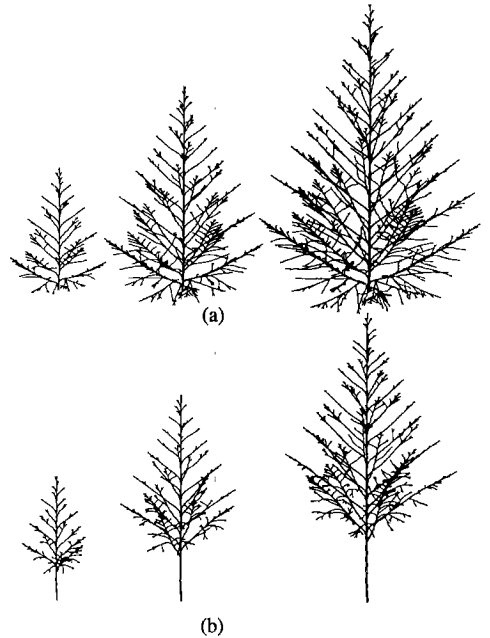


図 17 活性枝のシミュレーション  
Fig. 17 Simulation of active boughs.

効果を「シナリオ」で組み込んだシミュレーション例を示す。(a)は「針葉樹」の分枝モデルによって生成された樹形を世代を追って示したものである。(b)は活性期を過ぎた下枝は枯れ落ちるとしてシミュレーションしたものである。

このように、(2)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。

更に、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** 日ごろ御討論頂く、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。なお、本研究の一部は文部省科研費(一般研究(c)02680015)の補助による。

## 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 (1974-06)。
- (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，斎藤伸自：“自然の画像生成—木の手続き的形状定義法”，情報学会グラフィックスと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).
- (8) 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).
- (9) Aono M. and Kunii T. L.: “Botanical Tree Image Generation”, IEEE CG & A, pp. 10-34 (May 1984).
- (10) Smith A. R.: “Plants, Fractals, and Formal Languages”, Computer Graphics, 18, 3, pp. 1-10 (July 1984).
- (11) Oppenheimer P. E.: “Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees”, Computer Graphics, 20, 4, pp. 55-64 (1986).
- (12) Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. and Hanan J.: “Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes”, Computer Graphics, 22, 4, pp. 141-150 (Aug. 1988).
- (13) 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 (Aug. 1988).

(平成3年2月28日受付，8月16日再受付)

### 高橋 清明



平2岩手大・工・情報卒，同年同大大学院修士課程進学。現在，コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。

### 斎藤 伸自



昭26東北大・工・電気卒，同大・工・通信教授。工博。超短波帯雑音，分布定数回路，帯域制限パルス波形，グラフ理論とその応用などの研究に従事。平2本学会業績賞受賞。著書「回路論」，訳書「グラフ理論入門」など。情報処理学会会員。



### 金丸 直義

昭62東北大・工・通信卒。平1同大大学院博士前期課程了。現在，同後期課程に在学中。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。情報処理学会会員。



### 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に勤務。昭59東北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ックス，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, 1988)，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。