

景観表示のための樹木の生成手法†

安居院 猛^{††} 福田 智美^{††} 中嶋 正之^{††}

近年、建築設計、都市計画の分野での CAD システムでは、CG 技術の進歩によって、設計対象物の製図のほかに、対象物を中心とした景観表示まで取り扱われるようになってきている。景観図の中の要素として建築物や、自然物である地形、植物などがある。CG によって自然物を生成する手法は多数提案されているが、実用化されているものは多くない。そこで本論文では、特に樹木に着目し、景観表示に必要な経年変化にも対応可能な生態的要素を取り入れた樹木の生成手法について述べる。提案する手法は生態的なパラメータを導入し、成長シミュレーションを行いながら樹形を生成しており、形態因子として枝のたわみ、環境因子として日光照射量を考慮している。

1. ま え が き

近年、建築設計、都市計画の分野において、CAD システムの開発が盛んに行われている。初期の建築設計、都市計画の CAD システムでは、製図機能を中心に開発された。最近では、CG (computer graphics) 技術が進歩したことから、設計対象物の製図、さらには、その対象物を中心とした景観表示にまで関心が寄せられている。さらに景観表示の効果的な道具として、CG によるアニメーションもいくつか作成されるようになった¹⁾。

CAD システムでの景観表示、景観シミュレーションのアニメーションを作成する際、景観図の中の要素として、建築物と、自然物である雲、地形、樹木、川などがある。CG によって対象物を作成できるならば、そのシステムは非常に柔軟性のあるものになる。CG によって対象物を表示するためには、対象物の形状を示す数値データを入力する必要がある。自然物の場合、その自然物が属する種類のものの中のある一つを測定し数値データを入力したとき、測定したときの様子を描写するにはそのデータを用いればよい。しかし、測定したときとは異なる状況で対象物を表示したいとき、または、その自然物が属する種類のものを複数個、生成したいとき、再度、対象物を測定しなければならないのは煩雑である。

本論文では、自然物の中で、特に樹木に着目し、建築設計、都市計画などの CAD システムで使用可能な樹木の自然な枝ぶりを生成するための手法について述べる。

2. 景観用の CAD システムについて

景観表示のための CAD システムには、以下の条件を考慮することが望ましい。

1. 極力、共通のパラメータにより多種類の樹木に対応できること。
2. 同一樹木の変化に富んだ樹形を自動的に生成できること。
3. より自然な景観を生成させるため、各種の環境に対応できること。
4. 経年変化にも対応できること。

条件 1. は、特に日本の庭園や街路の CAD には、不可欠な条件であり、本論文では、分岐とその角度のパラメータ等の形態因子を導入し、各種の樹木の枝ぶりを生成させている。条件 2. は、並木道などを構成するために必要な条件であり、本論文では、フラクタルによる自然物体の生成において広く利用されている、パラメータに乱数を付与することにより、様々な樹形の生成を行っている。条件 3. は景観シミュレーションに現実感を付与するために必要な条件であり、本論文では、環境因子として日光照射量を考慮したパラメータを導入している。また条件 4. は、必ずしもすべての景観用 CAD システムにおいて必要とされる条件ではないが、経年変化を考慮した景観シミュレーション画像を作成するときに必要とされる条件であり、本論文では、形態因子のパラメータを用いることによって、景観表示に必要な樹木の経年変化にも対応することができることを確かめている。

樹木は形状の測定が困難な自然物の一つであることから、枝ぶりの生成アルゴリズムについては、従来から多数の論文が発表されている^{2)~8)}。例えば、文献 2) は、枝分かれのフラクタルモデルを提案し、文献 3) では、A システムと名づける対話的に枝分かれ規則を

† Botanical Tree Generation Method for Scenery Rendering by TAKESHI AGUI, SATOMI FUKUDA and MASAYUKI NAKAJIMA (Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology).

†† 東京工業大学工学部情報工学研究施設

利用する生成アルゴリズムを提案し、文献4)では、日照を考慮した生成法について検討し、文献5)では、樹木の成長モデルを提案し、文献6)では、植物的な性質に合致したモデルを提案し、文献7)では、形式言語による生成法を提案し、文献8)では、Lシステムと名づける成長モデルの提案を行っている。このように樹木の枝ぶりに関する論文は、多数あるが、必ずしも景観用 CAD の作成を目的にしたものでないため、先に列挙した景観 CAD システムとして必ずしも適していない。そこで本論文では、景観 CAD を目的に、枝ぶりのパラメータに対して乱数を付与し、環境パラメータを考慮することにより、極力自動的に各種の樹木を生成する簡単なアルゴリズムの提案を行う。

3. 樹木の枝ぶりの生成アルゴリズム

本論文で提案する樹木の生成アルゴリズムとそのアルゴリズムを用いた樹木の成長過程について述べる。

3.1 樹木のレンダリング

枝ぶりの生成のパラメータを決定し、それらを用いて生成結果を表示する際に、以下に述べるような表示方法を用いる。

一本の枝を表示する際、プリミティブとして六角錐台を用いる。枝の長さを高さ、この枝に対する親枝の半径を下部の六角形の外接円の半径、この枝の半径を上部の六角形の外接円の半径とする。図1に示すよう

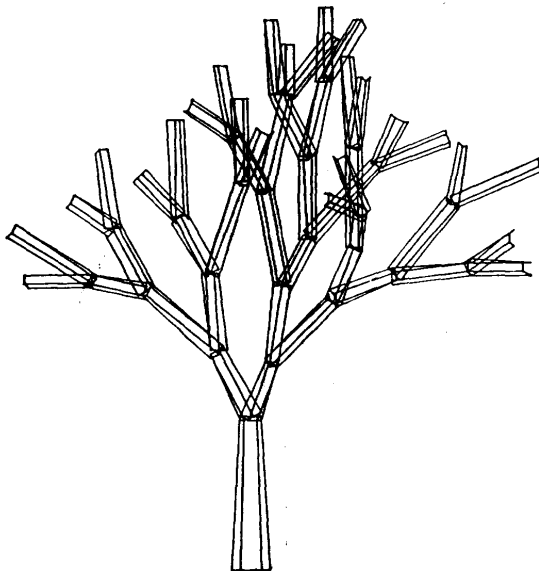


図1 プリミティブによる枝ぶりの表示

Fig. 1 Representation of branches with primitives.

に、枝のプリミティブをその枝の分枝角度に従って変換し、この枝の親枝の先端に取り付ける。

3次元の現実性のある樹木を生成することが目的であるため、スムーズシェーディング⁹⁾を施した画像を作成し、用いたパラメータの効果を調べる。

3.2 枝ぶりを決定するアルゴリズム

3.2.1 枝ぶりを生成する基本量

樹木を生成する際、まず始めに枝ぶりを決定しなければならない。基本となるパラメータは枝の長さと同分枝角度である。本論文で扱った樹木の分枝角度は図2に示すように、親枝に対する θ 方向と ϕ 方向の成分で指定する。分枝する枝に対して強弱をつけ、栄養分の配分のされ方に一定の比率を設定する¹⁰⁾。すなわち、強い枝に対する弱い枝の栄養分の配分比を f_i ($0 \leq f_i \leq 1$) とする。すべての枝は、栄養分が1に溜るまで分枝できない。この栄養分の配分のされ方によって、二又分枝の樹形、側方分枝の樹形などさまざまな樹形を描くことができる。枝を生成する際、枝の番号は、枝を発生させていく順序に従ってつける。栄養分が輸送された際、一つの枝先だけで分枝が発生したとき、または複数の枝先で分枝が同時に発生したとき、これを一代ととする。

さらに、樹形を自然に生成させるために、ランダムな量を導入する。枝の長さ、分枝角度のそれぞれにある一定の範囲で変動するランダムな量を樹木の種類ごとに設定する。枝の長さ、分枝角度の θ 成分、 ϕ 成分のそれぞれの基本量を b_0 , θ_0 , ϕ_0 とし、それぞれのパラメータのランダムな量を Δb_0 , $\Delta \theta_0$, $\Delta \phi_0$ とし、枝の長さ、分枝角度を式(1), (2), (3)のように表す。

$$b = b_0 + \Delta b_0 \quad (1)$$

$$\theta = \theta_0 + \Delta \theta_0 \quad (2)$$

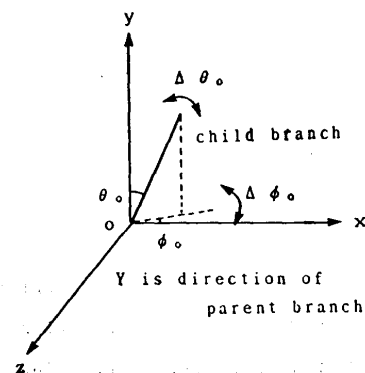


図2 分枝角度を表すパラメータ

Fig. 2 Parameters of branching angles.

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi_0 \quad (3)$$

b_0 , θ_0 , ϕ_0 のランダムな量の絶対値の最大値を、それぞれ $|\Delta b_0|_{\max}$, $|\Delta\theta_0|_{\max}$, $|\Delta\phi_0|_{\max}$ と表す。樹木の幹と枝の長さの基本量を与える方法では、地面から生えている幹の部分の長さ以外は区別していない。地面についている幹の部分は、 b_0 とは別に基本量を与えているので b_a と表す。枝の半径の基本量は r_0 と表し、それぞれの枝の半径 r は、乱数を用いながら減少させる。

以上のパラメータだけでは、自然な樹形を常に得られるとは限らない。乱数を用いているため、数本の枝が不自然なほど密集してしまったり、枝どうしが交差してしまう場合がある。このような場合を回避するため、枝を一本ずつ生成させるたびに他の枝と接近しすぎていないかどうかチェックする。枝どうしが交差していなくても互いの枝の半径を加えた距離以内に接近していたら、その枝の分枝角度を修正する。修正の方法は、図3に示すように4通りの回避の方向を設定しておき、樹木の種類ごとに、回避できる角度を定めておく。この角度の θ 成分と ϕ 成分をそれぞれ $\Delta\theta_m$, $\Delta\phi_m$ とする。図3の①, ②, ③, ④の分枝角度の修正方法を式(4), (5), (6), (7)に示す。

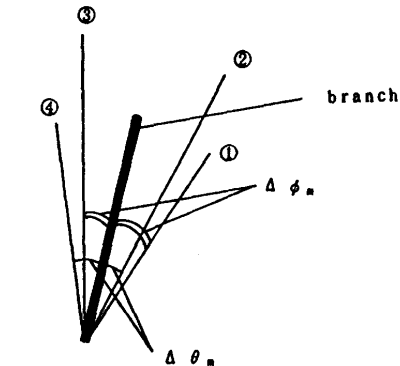
$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi_0 + \Delta\phi_m \quad (4)$$

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta_0 - \Delta\theta_m \quad (5)$$

$$\phi = \phi_0 + \Delta\phi_0 - \Delta\phi_m \quad (6)$$

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta_0 + \Delta\theta_m \quad (7)$$

式(4), (5), (6), (7)の順番で回避させるが、回避させるごとに他の枝とのチェックを行い、交差していなければ次の枝を生成させる。すべての場合に交差



①, ②, ③, ④: corrected angles

$\Delta\theta_m$: θ -component correction

$\Delta\phi_m$: ϕ -component correction

図3 枝の回避のしかた

Fig. 3 Correction of branching angle.

してしまう場合はその枝を発生させない。この回避方法では、その樹木自身の枝どうしの交差の回避のほか、樹木が群生している場合の枝の回避や、樹木以外の障害物を回避しながら成長する様子を表示することができる。

3.2.2 枝ぶりの生成に必要な環境因子

本手法では、枝ぶりを支配する光として地面に垂直な平行光線を考慮する。

図4に示すように樹木の葉の広がり厚さを無視できる円盤で近似する³⁾。円盤の半径は、一本の枝に付いている葉全体を真上から見た広がり大きさに見合うように設定する。その円盤は、地面に平行に、ある枝の番号以上の枝先すべてに付いていると仮定し、すべての枝について、この円盤による影を計算する。つまり、葉の重なりを円盤の重なりで近似する。計算を簡単にするために、すべての円盤は日光を等しく遮るものとする。影の量のしきい値を設定し、それよりも影の量が多くなったら、その枝の分枝角度を修正する。このときの修正方法は、先に述べた枝の交差の回避の方法と同じとする。

3.2.3 枝ぶりの生成に必要な形態因子

前項までに述べた生成手法では、枝の重さを考慮した枝のたわむ様子を生成することができない。本項では、枝の重さによる枝のたわみを考慮した枝ぶりの生成手法について述べる。

すべての枝について、その枝の子枝の枝先から発生したすべての枝の重さを計算する。図5に、注目している枝の先端が支えなければならない子枝の例を示す。図5では、注目している枝が支えなければならない小枝を丸印で示してある。この枝にかかる重さは、

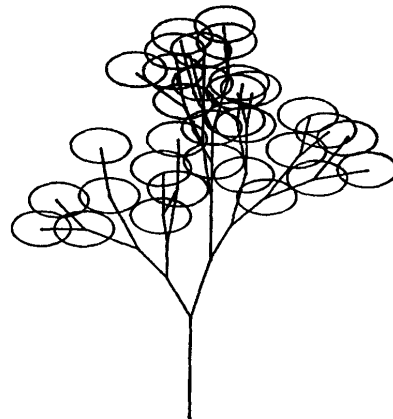


図4 葉の広がり厚の代用である円盤の配置のしかた
Fig. 4 Location of disks substituted for spread of leaves.

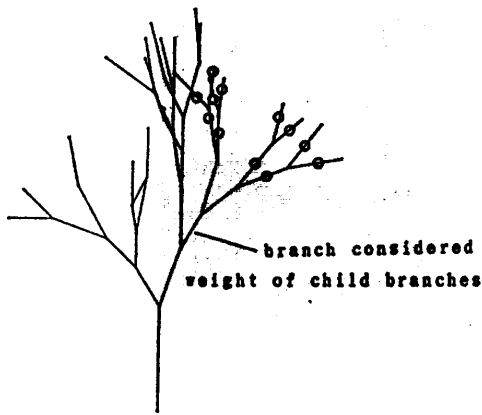


図5 小枝の重さによってたわむ枝の例

Fig. 5 An example of branch weighed down with child branches.

その枝のすべての場所で同じではない。実際に、その枝自身の重さと小枝の重さによるモーメントと、その枝の応力によるモーメントのつりあいを保たせながら枝をしならせるようにすればよいが、近似的に枝の先端にかかる重さによって、その枝の先端を下げるようにした。枝の重さは、生成された順序に従って減少するものとする。それぞれの枝の先端にかかる重みに一定の係数 α をかけて分枝角度を修正する。修正する分枝角度を $\Delta\theta_i$ とすると、分枝角度は式(8)のようになる。

$$\theta = \theta_0 + \Delta\theta_0 + \Delta\theta_i \quad (8)$$

ここで $\Delta\theta_i$ は、それぞれの子枝の重さを c_i として、式(9)のように表される。

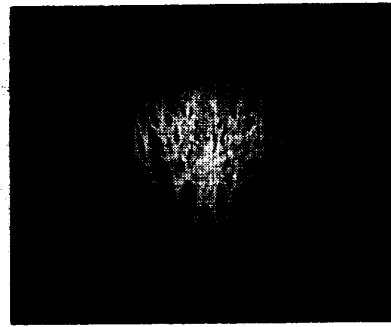
$$\Delta\theta_i = \alpha \sum c_i \quad (9)$$

4. 実験結果

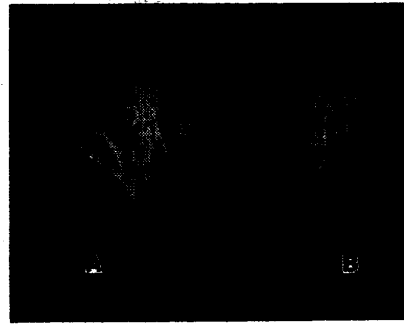
前章において述べた枝ぶりの生成アルゴリズムを用いて樹形を生成させた結果について述べる。実験に用いた計算機は VAX 11/750, 言語は UNIX 上の C, 表示装置は NEXUS 6400 である。

4.1 樹木どうしが接近している場合の樹形の生成例

2.2.1 項で述べた枝の回避の様子がはっきり現れる例として樹木が接近している場合がある。ここでは、2本の同種の樹木が接近している例について扱う。図6(a)に接近した状態で成長している同種の樹木の例を示す。次に、一方の樹木 A が生育している近くに、他方の樹木 B が配置されていて、A は B よりも勢力のある樹木と仮定する。A の枝の方が成長が速いので、B は枝を発生させる方向を捜しながら成長しなければ



(a) 2本の同種の樹木が接近している例
(a) An example of growing two neighbouring trees.



(b) 2本の接近している同種の樹木が離れている場合
(b) A separately represented example of growing two neighbouring trees.

図6 2本の同種の樹木が接近している例
Fig. 6 An example of growing two neighbouring trees.

ならない。その結果、枝の回避の方法で述べたように発生させない枝がでてくるので、B の成長はさらに遅くなる。図6(b)に接近した状態で成長している2本の樹木を離して表示した例を示す。(b)で左側の樹木がA、右側の樹木がBであり、同じ条件で生成した。

4.2 環境因子を考慮した樹形の生成例

日照射量を考慮していない枝ぶりとは考慮している枝ぶりの例を、図7、図8に示す。(a)、(b)、(c)は、それぞれ正面、側面、上面の方向から見た樹形である。両図の樹形は、日照射量以外は同じパラメータで樹形を生成している。この例では、影のしきい値を、円盤の重なりで10個とし、重なりが10以下ならば、その枝をそのままにし、10以上ならば、その枝を回避させ、回避できない場合はその枝を取り除くという処理を行っている。葉の代用である円盤の半径は、枝の長さの基本量と等しくしている。この数値は、いくつか実験した結果、枝ぶりの偏りをできるだけ少なくする効果のあったものである。この場合、枝

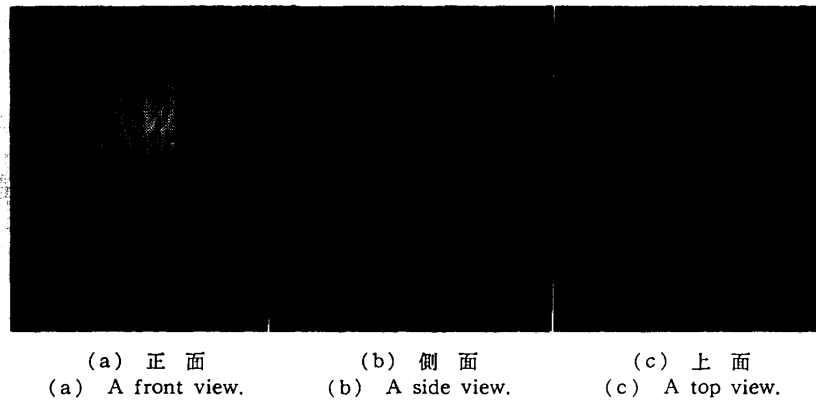


図 7 日照射量を考慮していない枝ぶり
Fig. 7 Tree shape without consideration of sunlight.

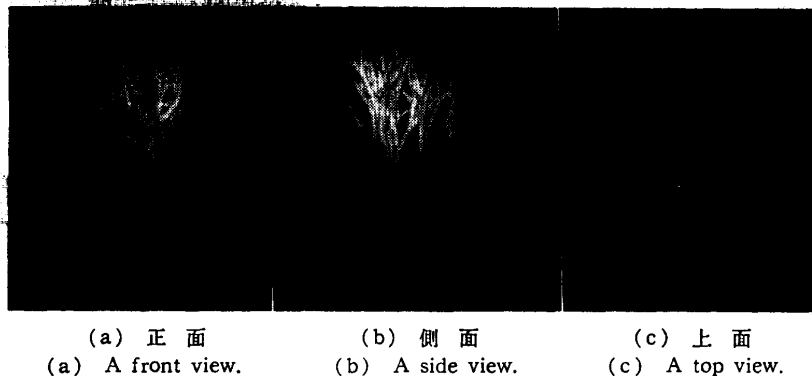


図 8 日照射量を考慮した枝ぶり
Fig. 8 Tree shape with consideration of sunlight.

の重さによる枝のたわみは考慮していない。生成された樹形を見ると、正面、側面から見た樹形には日照射量の考慮の有無の違いが見られないが、上面から見た樹形では、日照射量を考慮していない樹形より、考慮した樹形の方が形状に偏りが少ないことが視覚的にわかる。

4.3 形態因子を考慮した樹形の生成例

枝の重さの係数である α を変化させたときの樹形を図 9, 10 に示す。両図の樹形において、日照射量の悪い枝は回避、または取り除いている。図 9, 10 の樹形では、 α が増加するにつれて根元の幹から小枝と

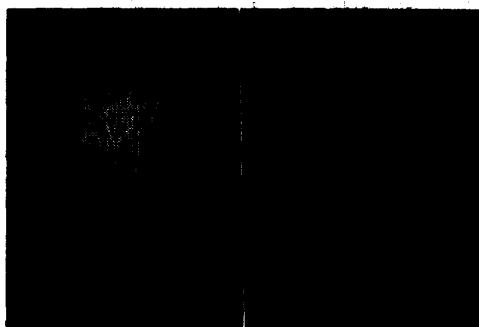


図 9 枝の重さを考慮した枝ぶり ($\alpha=0.001$)
Fig. 9 Tree shape with consideration of weight of branches ($\alpha=0.001$).

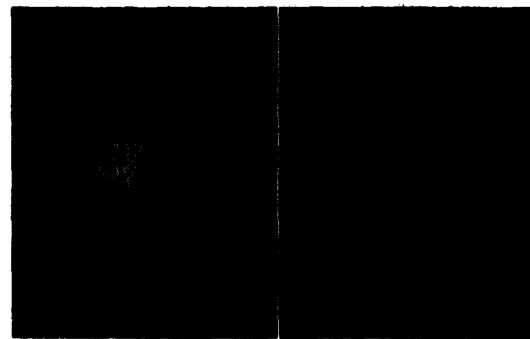


図 10 枝の重さを考慮した枝ぶり ($\alpha=0.02$)
Fig. 10 Tree shape with consideration of weight of branches ($\alpha=0.02$).

して発生している枝がたわんだ結果、正面から見た樹形が広がるようになり、また上面から見た樹形では、それぞれの枝がそれ自身にとって環境のよい場所を捜しながら生長している様子がわかる。

4.4 枝ぶりの生長過程

枝ぶりの生長の様子を解析するために、世代ごとにおける枝の総数を求める。この結果を図 11 に示す。9 世代ごろまでは急激に枝が発生しているが、10 世代ごろから、ある程度枝が発生すると、すぐ後の世代では枝が取り除かれるという過程が繰り返される。これは日陰になった枝が取り除かれる際、その枝より発生しているすべての小枝が取り除かれるようにしてあるので、10 世代以降で枝の総数の変動が激しくなっている。これらの様子から、提案する生成アルゴリズムによって樹木の高さを制御可能であることがわかる。以上、本論文で提案した枝ぶりを生成するアルゴリズムを図 12 に示す。また、本アルゴリズムにより各種の樹木を生成した例を図 13 にそのパラメータを表 1 に示す。

5. むすび

本論文では、景観用 CAD の作成を目的とした、各種の生態的な要素を考慮した樹形の生成手法について述べた。

本手法により生成した樹木を建築物の回りに配置した例を図 13(d) に示す。この図において、同一の樹種が個々の木ごとに形状が微妙に異なっており、自然感を与えていることが分かる。

今後の予定としては、景観用 CAD システムにお

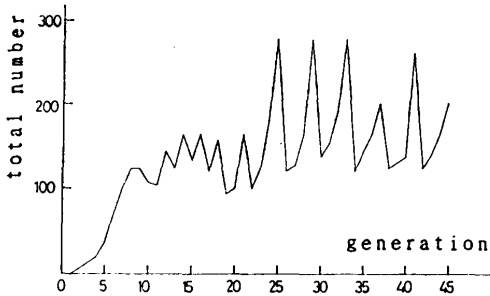


図 11 世代ごとの枝の総数
Fig. 11 Total number of branches for each generation.

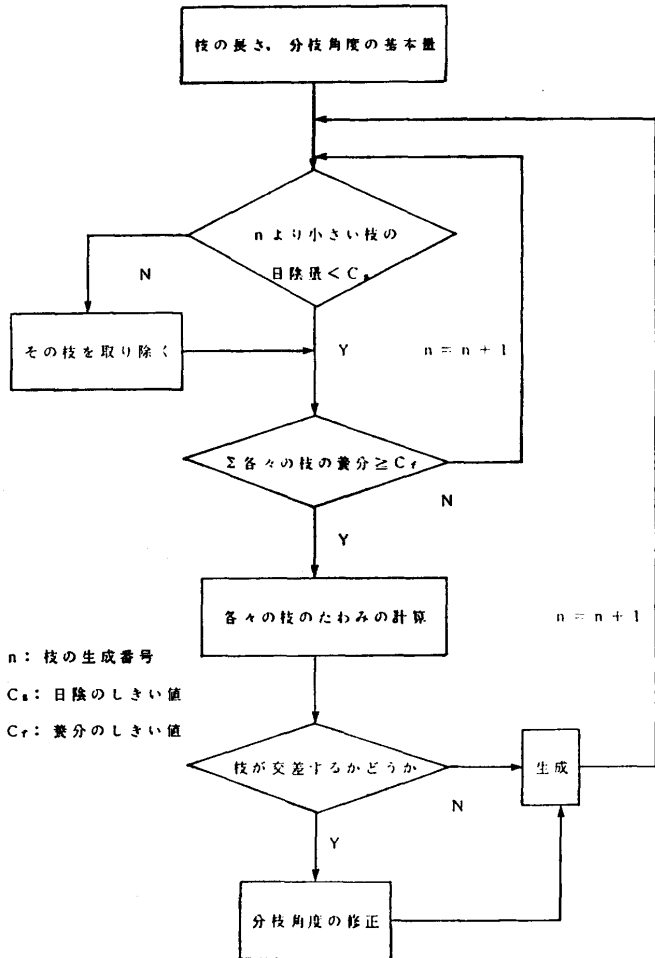


図 12 枝ぶりの生成アルゴリズムを示すフローチャート
Fig. 12 Flow chart of the branches generating algorithm.

表 1 図 13 の樹木の生成に使用したパラメータ
Table 1 The parameter list of the trees on Fig. 13.

	ケヤキ	ソメイヨシノ	イチヨウ	プラタナス
$b_d : b_0$	2 : 1	2 : 1	5 : 3	5 : 4
θ_0	18°	15°	30°	25°
ϕ_0	0°	0°	0°	0°
$ \Delta\theta_0 _{\max}$	10°	10°	10°	10°
$ \Delta\phi_0 _{\max}$	55°	60°	70°	60°
$b_0 : \Delta b_0 _{\max}$	3 : 1	3 : 1	6 : 1	8 : 1
$b_0 : r_0$	6 : 1	15 : 2	6 : 1	80 : 13
$\Delta\theta_m$	15°	15°	15°	15°
$\Delta\phi_m$	15°	15°	15°	15°
f_n	0.95	0.99	0.45	0.60
円盤の半径	$b_0 \times 1.0$	$b_0 \times 1.0$	$b_0 \times 0.5$	$b_0 \times 0.75$
陰のしきい値	10	10	15	10
枝の重さの係数	0.002	0.02	0.015	0.035
葉の形状	長楕円形	倒卵形	篇形	広卵円形
複葉の形状	奇数羽状	奇数羽状	奇数羽状	奇数羽状
複葉の付き方	互生	互生	互生	互生

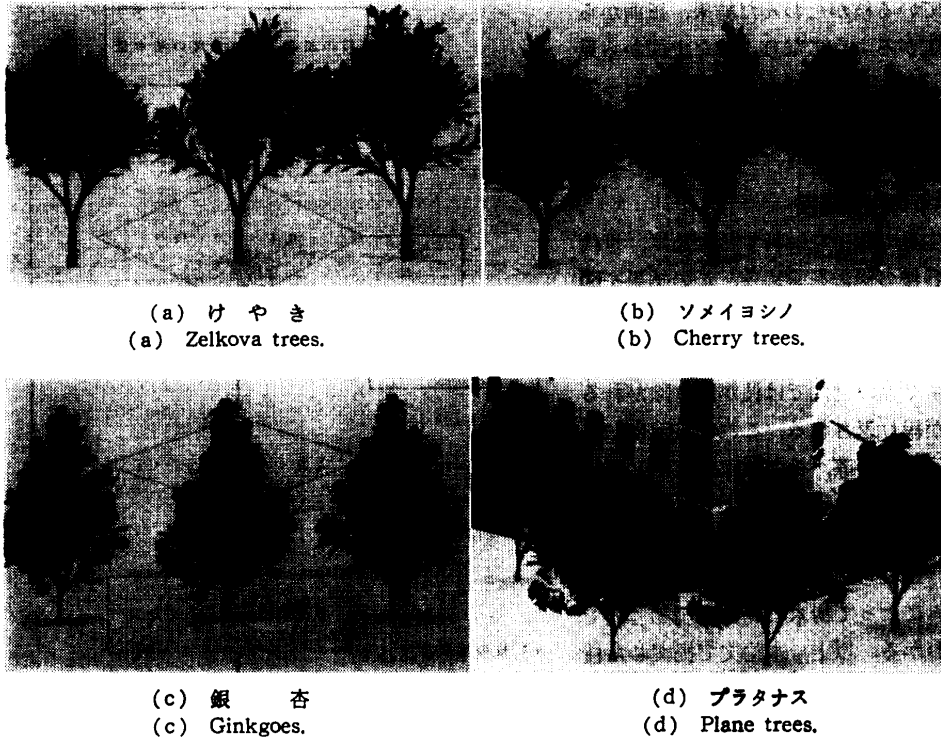


図 13 各種の樹木の作成例
Fig. 13 The examples of the trees generated by our algorithm.

けるヒューマンインタフェースの設計やさらに複雑な樹形（例えば枝がねじれている樹形や成樹に対して、形状がかなり異なってしまう老樹等）の生成アルゴリズムさらに森林などの群生状態の生成などの検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 沢井：建築設計，都市計画のための CG アニメーションの可能性，第2回 NICOGRAPH 論文集，pp. 246-253 (1986).
- 2) Oppenheimer, P.E.: Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees, *ACM-SIGGRAPH*, Vol. 20, No. 4, pp. 55-64 (1986).
- 3) Aono, M. and Kunii, T.L.: Botanical Tree Image Generation, *IEEE CG & A*, pp. 10-33 (May 1984).
- 4) 奥村, 小川: 光天球の中で成長する樹形, *SIENCE ON FORM*, Vol. 2, No. 1, pp. 59-88 (1986).
- 5) 金丸, 千葉, 斎藤: CG のための樹木の成長モデルについて, 情報処理学会グラフィクスと CAD シンポジウム, 87-7, pp. 19-27 (1987).
- 6) de Reffye, P. and Puech, C.: Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development, *ACM-SIGGRAPH*, Vol. 22, No. 4, pp. 151-158 (1988).
- 7) Smith, A.R.: Plants, Fractals, and Formal Languages, *ACM-SIGGRAPH*, Vol. 18, No. 3, pp. 1-10 (1984).
- 8) Prusinkiewicz, P., Lidenmayer, A. and Hanan, J.: Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purpose, *ACM-SIGGRAPH*, Vol. 22, No. 4, pp. 141-150 (1988).
- 9) Bui Tuong Phong: Illumination for Computer Generated Pictures, *Comm. ACM*, Vol. 18, No. 6, pp. 311-317 (1975).
- 10) Honda, H., Tomlinson, P.B. and Fisher, J.B.: Computer Simulation of Branch Interaction and Regulation by Unequal Flow Rates in Botanical Trees, *Am. J. Bot.*, Vol. 68, No. 4, pp. 569-585 (1981).

(平成2年10月9日受付)

(平成3年2月12日採録)

**安居院 猛**

昭和34年東京工業大学工学部電気卒業。昭和39年同大学院博士課程修了。現在、同大像情報工学研究施設教授。制御理論、印写機器、コンピュータ・アニメーションなどの研究に従事。工学博士。52, 55, 60年度日本印刷学会論文賞受賞。著書「画像工学の基礎」(昭晃堂), 「コンピュータグラフィックスの技法」(新オーム文庫)。

**中嶋 正之 (正会員)**

昭和44年東京工業大学工学部電気卒業。昭和50年同大学院博士課程修了。同年同大勤務。現在、同大像情報工学研究施設助教授。コンピュータ・グラフィックス、画像処理の研究に従事。工学博士。52, 55, 60, 63年度日本印刷学会論文賞受賞。著書「画像工学の基礎」(昭晃堂), 「パソコングラフィックス入門」(オーム社)。

**福田 智美**

昭和62年青山学院大学理工学部物理卒業。平成元年東京工業大学大学院物理情報修士課程修了。同年東芝総合研究所情報システム研究所入社。コンピュータグラフィックスの研究に従事。