

さまざまな樹種に対応可能な樹木の生長モデル

金山知俊 † 阪田省二郎 ‡ 増山繁 †

† 豊橋技術科学大学 知識情報工学系 † 電気通信大学 情報工学科

† 〒 441 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1

‡ 〒 182 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

あらまし CGで樹木を含む景観シミュレーションを行なう場合、樹木の生長モデルはさまざまな樹種を生成できることや、樹木の経年変化や季節変化を表現できることが重要である。本研究では環境の影響や樹木の性質、樹木の構造、樹木の経年変化を考慮し、かつさまざまな種類の樹木を生成できる生長モデルを作成した。生長モデルは光環境モデル、ホルモンモデル、分枝モデルの3つのモデルから構成されている。各モデルは互いに影響を及ぼすことで樹木の生長制御を行っており、各モデルに与えるパラメータを変えることで様々な樹種への対応を可能とした。過去の研究ではこれだけの要件を兼ね備えた生長モデルは見られない。

和文キーワード コンピュータグラフィックス 景観シミュレーション 樹木の生長モデル

A Growth Model of Botanical Trees Having Abilities to Generate Many Kinds of Trees

Chishun KANAYAMA † Shoujiro SAKATA ‡ Shigeru MASUYAMA †

† Department of Knowledge-Based Information Engineering, Toyohashi University of Technology

‡ Department of Computer Science and Information Mathematics, The University of Electro-Communications

† 1-1 Hibari-ga-oka, Tenpaku-cho, Toyohashi-shi 441, Japan

‡ 1-5-1 Chofu-ga-oka, Chofu-shi 182, Japan

Abstract Where we simulate the landscape including botanical trees based on computer graphics technology, it is desirable to be able to generate many kinds of trees, and be able to represent a secular change and seasonal change in the shapes of trees. We make a growth model of botanical trees which consider the influence of environment, the structure of a tree and the secular change of a tree, and having abilities to generate many kinds of trees. The growth model is constructed by 3 models, which are light environment model, plant hormone model and branch model. Each of models controls a growth of tree to influence the other, and it can generate many kinds of trees by changing parameters to give for each of models.

英文 key words computer graphics, landscape simulation, growth model of botanical tree

1 はじめに

コンピュータの性能向上によって、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。以前は困難だ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のリアルさを持つようになってきた。

樹木は自然物の中でも身近なものの一つであり、CG による樹木の画像生成については様々な研究が行われている。建築や庭園設計などで景観シミュレーションを行なう場合、リアルな樹木を表示することは重要である。この際、様々な樹種を生成することが可能であれば、樹種による景観の違いを観察することができる。さらに、樹木の経年変化や季節変化を表現することができれば将来の景観予測が可能になり、設計の際の指針とすることができる。樹木の生長モデルの作成は自然物の CG 表現の中でも重要なテーマといえよう。

樹木のモデルは今までも様々な研究者によって提案されている。これらは大きく分けて、環境を考慮していないモデル [1, 2, 3, 4, 5] と、環境を考慮したモデル [6, 7, 8, 9] とに分けられる。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、乱数によって個体差のある樹木は得られても、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 [6, 7, 9]。これらの生長モデルでは、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、屈地性、頂芽優性、休眠芽の休眠打破、枝の幹化等の樹木の性質を表現できる生長モデルも提案されている [8]。しかし、環境を考慮した従来の生長モデルは、逆に葉序などの、環境と関係無く一意に決まる樹木の構造を再現していないものが多く、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。

そこで本研究では、環境の影響や樹木の性質、樹木の構造、樹木の経年変化を考慮し、かつさまざまな種類の樹木を生成できる生長モデルを作成することを目標とし、作成した生長モデルを用いて数種の樹木について生長シミュレーションを行なった。

環境としては光、重力、風等が考えられるが、今回は樹木の生長に最も大きな影響を与える光環境を主として考慮し、重力については屈地性を取り入

れることとした。

樹木の性質を再現する方法としては、1種類の架空の植物ホルモンを仮定してモデルを作成した。今回考慮した樹木の性質は以下のものである [10, 11, 12]。

- **頂芽優勢** 頂芽から発芽した枝 (頂生枝) が側芽から発芽した枝 (側生枝) よりも勢いよく生長する性質
- **休眠芽の休眠打破** 休眠芽が、その近くの枝が折れたり切られたりしたときに無くなった枝の代わりに発芽する現象
- **枝の短枝化** 頂芽に抑制されたために本来長く伸びることのできる枝がほんの僅かしか伸びない現象 (長く伸びた枝は長枝という)
- **屈光性** 枝が光の強い方向に曲がる性質
- **屈地性** 枝が重力と反対の方向 (上方向) に曲がる性質

樹木の構造を再現する方法としては、現実の樹木の構造を分枝モデルに反映させることで実現した。

樹木の経年変化と様々な樹種への対応は生長モデルに与えるパラメータを適切な値に設定することで可能とした。

過去の研究ではこれだけの要件を全て兼ね備えた生長モデルは見られない。

2 生長モデル

今回生長モデルを作成するにあたって、以下の事柄を考慮した。

1. 光の影響を考慮し、枝の枯死や屈光性を表現する。
2. 樹木の性質である頂芽優勢や休眠芽の休眠打破等を実現する。
3. 節、葉序などの枝の構造を正しく再現する。
4. 樹木の経年変化に対応する
5. さまざまな種類の樹木を生成できるようにする。

1. は、環境によって変化した自然な樹形の生成を可能とするためには欠かせないため、過去の研究でも数多く行われている。2. は、より現実の樹木

に近いリアルな樹形を得るためには重要であり、剪定への対応も可能である。ホルモンを用いる手法はまだあまり研究されていないが、現実の樹木の生長を考えると有効な手法といえる。3. は、特に近景の場合に、樹種が判別できるほどのリアルな表現を可能とするためには必要な事柄である。4. は、樹木の生長過程を観察する際に重要である。特に長期間の生長シミュレーションをおこなう場合には欠かせない。5. は、庭園設計などの景観シミュレーションに応用する場合、特に重要となる。単一の樹種しか生成できないモデルでは応用の範囲が限られてしまうだろう。これらの5つの事柄のうち、1つか2つ程度を考慮したモデルは過去の研究でも存在するが、5つ全てを考慮したモデルは本モデル以外には見られない。

上記5つの事柄を考慮して、生長モデルは光環境モデル、ホルモンモデル、分枝モデルの3つのモデルによって構成することとした。光環境モデルは光による樹木への影響を求めるモデル、ホルモンモデルは仮定した植物ホルモンによって樹木の性質を再現するモデル、分枝モデルは枝の構造を再現するモデルである。生長モデルを3つに分割することでモデル1つ1つがコンパクトになり、モデルの修正、改良が容易に行える。また、将来より良いモデルに変更する際には、変更の必要な部分のみを入れ替えるだけでよい。

今回、光環境モデルについては文献[7]と同じ方法を用いた。ホルモンモデルは現実のホルモンの一つであるオーキシン[10]の作用を一部考慮した架空のホルモンを仮定してモデルを作成した。分枝モデルは、あらゆる樹種に共通の樹木の構造を再現し、さらに樹種による違いも表現できる汎用的なモデルを考案した。

各モデルは互いに影響を及ぼすことで樹木の生長制御を行っている。また、各モデルに与えるパラメータを変更することでさまざまな樹種に対応できるようになっている。加えて、パラメータを年ごとに変化させていくことで樹木の経年変化も表現可能である。

今回はモデル作成の手間を考慮して、葉や花のモデリングは行わず、葉の付く位置と葉数のみを規定した。また、樹種は幹と枝で分枝規則に大きな差異のない広葉樹に限ることにした。

2.1 光環境モデル

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、屈光性が表現できるからである。光環境を考慮しないモデルでは、生成した樹木が一見自然であるかのように見えても、それは与えられたデータや乱数によって作られた物であって、本当の自然さを表現してはいない。

今回、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[7]を用いた。まず、1本の枝から生えている葉を葉球という球で近似する。また、葉球を中心とした樹木を大きく包み込む天球という球を仮定し、天球の内面が光って樹木に光が降り注いでいると想定する。ここで、天球は非常に巨大であると仮定するので樹木のどの部分にある葉球でも天球の中心であるとみなすことができる。1つの葉球の受光量を求めるには、他のすべての葉球を天球に投影し、葉球が投影された部分の天球の光量を減少させる。こうして投影後の天球から受光量と光の強い方向が求められる。

2.2 ホルモンモデル

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。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[10]。植物ホルモンの作用を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。

植物ホルモンはオーキシン、ジベレリン、サイトカイニン、アブシジン酸、エチレン等、様々な物質が発見されており、それらの作用も一部明らかになってきている。しかし、植物ホルモンの作用にはいまだ解明されていない部分が多い。また、複数のホルモンの作用は独立ではなく、複雑な相関関係を持っているため、現実のホルモンの作用をすべて正確に再現することは困難である。

文献[8]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。このモデルは新しく生えた枝で生成された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いるが、これは現実のホルモンの作用をモデル化したものではなく、受光量によって生成されるホルモン量が増加するといった処理も行なわれていない。

しかしながら、現実の樹木の生長をモデル化す

る場合にホルモンを取り入れるならば完全な再現は無理でも現実のホルモンの作用をできるだけ考慮するべきと考えた。

そこで、今回は現実のホルモンであるオーキシンの性質を考慮しつつ、その性質に関して不明瞭な部分に対して仮定を行うことで植物ホルモンの作用を以下のようにモデル化することとした。

1. 制御を容易にするため、ホルモンは1種類だけとする
2. ホルモンは新しく生えた枝でのみ生成される。代表的な生長促進ホルモンのオーキシンは主に生えたばかりの葉や芽で作られることからこのように仮定した。
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左右される
4. ホルモンは枝先から幹、根の方向にのみ伝達される。現実のホルモンでもオーキシンは大部分が根の方向に移動する
5. 新しく伸びる枝は前年に親枝が持っていたホルモンを継承する
6. 頂芽は側芽よりホルモンを多く継承する

今回仮定したホルモンは枝先から幹の方向にのみ伝達されるので、文献 [8] のモデルのように平衡状態になるまで繰り返し計算を行なうという処理を行なわない。そのため計算時間を短縮できる。また、受光量によってホルモン生成量を変化させているので、親枝から継承したホルモン量が少ない枝が光を多く受けることで新たに多くのホルモンを生成して長く伸びるといった現象を再現できる。

ホルモンの計算は次のように行う。

新しく生えた枝 n の初期ホルモン量を H_{n0} 、枝 n の親枝 o の初期ホルモン量を H_{o0} 、頂芽から生える枝 (頂生枝) のホルモン継承率を α_t 、側芽から生える枝 (側生枝) のホルモン継承率を α_l とすると、

$$H_{n0} = \begin{cases} \alpha_t H_{o0} & : \text{頂生枝の場合} \\ \alpha_l H_{o0} & : \text{側生枝の場合} \end{cases}$$

光環境の影響計算後の枝 n 、枝 o のホルモン量をそれぞれ H_n と H_o 、枝 n の受光量を L 、受光量最大のときの枝 n のホルモン生成量を dH 、ホルモン減少率を β 、枝 n から枝 o へのホルモン伝達率を γ とすると、

$$\begin{aligned} H_n &= \beta H_{n0} + LdH \\ H_o &= \beta H_{o0} + \gamma H_n \end{aligned}$$

以下同様に、枝先から幹に向かって同様にホルモンが伝達されていく。

2.3 分枝モデル

樹木は幹から枝が分かれていくことで生長をする。分枝は樹木の骨格形状を決定するため、分枝のモデル化は生長モデルの中でも重要な部分である。しかしながら従来のモデルでは、現実の樹木の分枝を再現できないものや、特定の樹種の分枝しか考慮していないものが多かった。そこで、今回は樹木の分枝に共通の特徴を考慮してパラメータを変更することで様々な樹種に対応できる分枝モデルを作成した。

樹木は分枝に関して次のような特徴を持っている [11, 12].

- 枝には葉や芽ができる節がある。節と節の間は節間という
- 葉の生える位置には規則性 (葉序) がある
- 葉は新しく伸びた枝から生え、古い枝からは生えない
- 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、葉の腋にできる芽を側芽という。頂芽のすぐ横にできる側芽を頂生側芽とって他の側芽と区別することももある (図 1)
- 芽は枝あるいは花となる。花になる芽を花芽、枝になる芽を葉芽という。
- 枝には長く伸びた長枝と、ほんの僅かしか伸びなかった短枝がある。頂生枝は長枝、側生枝は短枝になりやすい (頂芽優勢)
- 分枝の仕方は大きく分けて真っすぐな主軸から枝が生える単軸分枝とジグザグに伸びながら枝分かれする仮軸分枝の2種類がある (図 2)。頂芽が花になる種類の樹木は必ず仮軸分枝となる

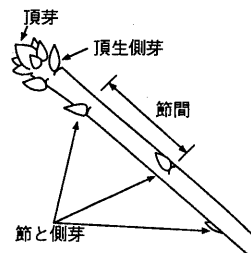


図 1. 枝の構造

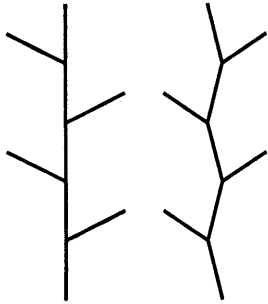


図2. 単軸分枝と仮軸分枝

これらはあらゆる種類の樹木に共通の特徴である。これらの特徴をモデル化したものが分枝モデルである。分枝モデルでは1本の枝の節の数や葉序、芽のつく位置、枝の分枝角などの数値を自由に設定することができ、樹種による違いを表現することができる。

分枝モデルで規定されるパラメータは以下のとおりである。

- 短枝の節数, 長枝の最大節数
- 短枝の節間長, 長枝の最大節間長
- 頂芽数, 頂生側芽数, 1つの節から生える側芽数
- 分枝の形式 (単軸分枝または仮軸分枝)
- 節での折れ曲がり角 (仮軸分枝のみ)
- 側生枝が親枝となす角度
- 葉序
- 屈地性, 屈光性の強さ
- 次世代の芽の発芽数
- 枝の初期断面積, 断面積増分

また、分枝モデルは光環境モデルやホルモンモデルで決定される植物ホルモンの量に影響を受ける。今回は以下のパラメータについてホルモンの影響を考慮した。

- 枝の節数, 節間長
- 屈地性, 屈光性の強さ
- 次世代の芽の発芽数

なお、今回は花芽と花のモデリングは考慮していない。

2.4 生長の制御

本生長モデルは光環境モデルからホルモンモデルへ、ホルモンモデルから分枝モデルへと影響を及ぼすことで樹木の生長を適切に制御している。

まず光環境モデルでは枝の受光量と光の強い方向が求められる。このとき受光量が少ない場合は枝は枯れてしまう。受光量が十分な場合は枝は生き残り、受光量をホルモンモデルに渡す。

ここで枝の枯死の処理に関して、枝が枯死する受光量のしきい値は乱数で微妙に変化させている。これはしきい値を一定値に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。ここで、乱数のシードを変更すれば、図7に示すように、同じ樹種で同じ環境条件でも、微妙に異なった樹形を生成させることができる。

ホルモンモデルではホルモンの生成と伝達、新しく生えた枝への継承が行われる。頂芽優勢や枝の短枝化を再現するために、新しく生えた枝へのホルモンの継承は、その枝が頂芽から伸びた枝の場合は多く、側芽から伸びた枝の場合は少なく継承させる。その後、受光量に応じて枝のホルモン生成量を調節する。

分枝モデルでは、分枝規則に基づいて枝の分枝を行うが、頂芽優勢や枝の短枝化を表現するために、枝のホルモン量によって、枝の節数や節間長を調節する。また、屈光性や屈地性の強さもホルモン量によって調節する。さらに、古い枝でホルモンの量が設定した値以上になったときや、上方の枝が折れて伝達されるホルモン量が急減したときに休眠芽の休眠打破を起こす。

分枝モデルではまた、枝を太らせる処理も行っている。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、今回は処理を簡単にするため葉の数で枝の太り具合を調節することにした。まず、発芽したばかりの枝はパラメータで規定された断面積となる。そして年ごとに枝を太らせる処理として、その枝またはその枝から生えているすべての小枝のもつ葉の数に比例して断面積を増加させている。

ところで、本生長モデルには各モデルに与えるパラメータを自由に設定することができるという特徴がある。光環境モデルに与えるパラメータを変えることで、同一の樹種でも環境の違いによる多様な樹形の生成が可能となる。また、ホルモンモデルと分枝モデルに与えるパラメータを変えることで、樹種による、分枝規則の違いや樹木の性質の現れ方の違いを表現することが可能となる。

3 生長シミュレーション

本モデルでの樹木一年分の生長の手順は次のようになる

1. 発芽可能なすべての芽を発芽させ、一定量生長させる
2. 各枝の受光量と光の強い方向を求め、受光量の少ない枝は枯死すると考え除去する
3. 残った枝について受光量からホルモン生成量を求める
4. 屈光性、屈地性を再現するために枝を曲げながら伸ばす。このときホルモン量で枝の伸長量や曲がり具合を制御する
5. 次の年に発芽する芽の数を求める。古い枝についても休眠打破の発生をチェックする

この処理を毎年繰り返して行なうことで樹木の生長シミュレーションを実現している。

加えて、芽の発芽数を年ごとに少しずつ変化させることで樹木の経年変化にも対応している。

なお、シミュレーションでは受光量の計算にもっとも時間がかかる。1本の枝の受光量を計算するためには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、その年の計算時間は $O(n^2)$ となる。このため、樹木全体の計算時間は枝数とその増え方によって大きく変化する

4 結果と考察

4.1 さまざまな樹種の生成

本モデルはパラメータの変更によってさまざまな異なる樹種を生成させることが可能である。実際に本モデルで作成した樹木を図3, 4, 5に示す。図3はサクラ、図4はケヤキ、図5はツツジの生成例である。

サクラの生成例では、頂芽優勢が強く、頂生枝が勢いよく伸びており、側生枝は抑制されていることが見てとれる。

ケヤキの生成例では、初めは頂芽優勢が強いため幹が長く伸び、その後頂芽優勢が弱まって枝が細かく分かれている様子がはっきりと分かる。

ツツジの生成例では、頂芽優勢が弱く、丸い樹形になっていることが分かる。

表1は図3, 4, 5の樹木の樹高と生成にかかった年数、計算時間である。どの樹木も15年のシ

ミュレーションを行なったが、樹高は樹種の違いに応じた高さとなった。また、計算時間もかなりの差がある。これは、樹種によって枝数の増え方に違いがあるからである。ケヤキは初めはあまり分枝しないので計算が速いのに対し、ツツジは初めから細かく分枝して枝数が急激に増加するため計算に時間がかかった。サクラはその中間である。

表1. 樹種ごとの計算時間等
(使用機種: SUN SPARC Station 1)

樹種	樹高	年数	計算時間
サクラ	3m14cm	15年	1分30秒
ケヤキ	4m06cm	15年	21秒
ツツジ	1m02cm	15年	2分08秒

4.2 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6に示す。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。

4.3 同じ樹種、同じ条件でのさまざまな樹形

本モデルでは枝の枯死の受光量しきい値を変化させる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7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が多数必要な場合はこの方法が有効である。

5 おわりに

本研究ではさまざま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、数種の樹木についてシミュレーションを行なった。その結果、同一の生長モデルで様々な異なる樹種を生成できることを確認できた。

今後はさらに多くの樹種についてパラメータを作成し、シミュレーションを試みる。また、針葉樹のように、幹と枝の分枝規則が異なる樹種への対応や、街路樹や植木では欠かせない、剪定の処理への対応も行う予定である。

参考文献

- [1] M.Aono and T.L.Kunii : "Botanical Tree Image Generation", IEEE CG&A, pp.10-34 (May 1984)
- [2] P.E.Oppenhemer : "Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees", Computer Graphics, 20, 4, pp.55-64 (1986)
- [3] P.Prusinkiewicz, A.Lindenmayer and J.Haman : "Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes", Computer Graphics, 22, 4, pp.141-150 (Aug 1988)
- [4] P.Reffye, C.Edelin, J.Francon, M.Jaeger and C.Puech : "Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development", Computer Graphics, 22, 4, pp.151-158 (Aug 1988)
- [5] G.V.Xavier, E.Georges, J.Nicolas and A.Didier : "Combinatorial Analysis of Ramified Patterns and Computer Imagery of Trees", Computer Graphics, 23, 3, pp.31-40 (Jul 1989)
- [6] 安居院猛, 福田智美, 中嶋正之 : "景觀表示のための樹木の生成手法", 情処論, Vol.32, No.5, pp.618-625 (May 1991)
- [7] 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", 信学論, Vol.J75-D-II, No.1, pp.76-85 (Jan 1992)
- [8] 大川俊一, 千葉則茂 : "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樹形の制御 -", グラフィックスとCAD, 62-6, pp.39-46 (May 1993)
- [9] 大崎恵一, 鈴木悌司 : "光環境を考慮した樹木の生長モデル", グラフィックスとCAD, 65-6, pp.37-44 (Oct 1993)
- [10] Wareing P. F. and Phillips I. D. J. (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)
- [11] 原襄, 福田泰二, 西野栄正 : "植物観察入門 [花・茎・葉・根]", 培風館 (1986)
- [12] 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)

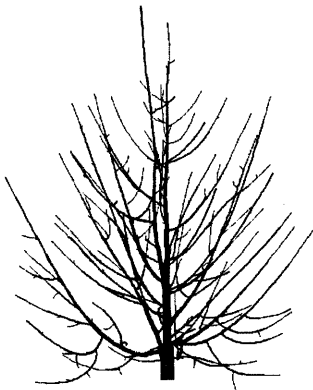


図 3. サクラの生成例

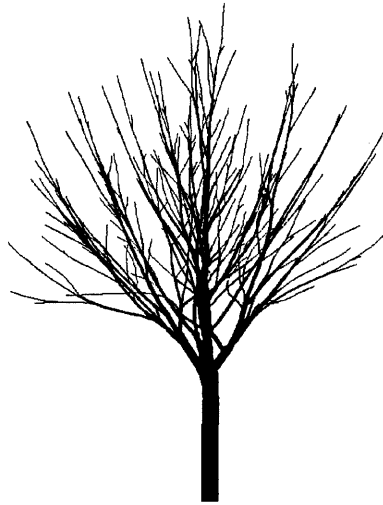


図 4. ケヤキの生成例



図 5. ツツジの生成例



図 6. サクラの生長

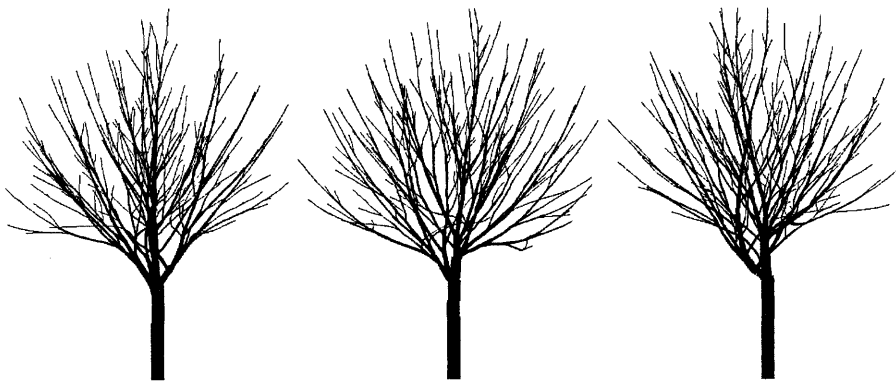


図 7. 同じ環境でのケヤキのさまざまな樹形