

自然の画像生成 — 木の手続的形狀定義法 —

石井啓資* 千葉則茂** 斎藤伸自*
*東北大学工学部 **仙台電波工業高等専門学校

自然物（現象）のリアルな画像生成は、造園設計やフライトシミュレーションなどの景観図の作成と、多くの応用をもつ重要な課題である。しかしながら、木や山や雲などの自然物は、人工物と比べ、その形状が複雑で多種多様であるため、通常の形状定義法では、設計や入力に多くの時間を必要とする。

本論文では、木としてケヤキをとりあげ、その手続的形狀定義法を与えた。この定義法は、自然な枝ぶりをもち、1本、1本が全て異なるが、やはりケヤキであると認識できるような木を多数生成できるため、並木のシミュレーションにも有効である。

"Simulation of Natural Scenes: Procedure Modeling for Trees" (in Japanese)
by Hiromoto ISHII (Tohoku University, Sendai, 980, Japan), Norishige CHIBA
(Sendai National College of Technology, Miyagi-chou, Miyagi, 989-31, Japan),
and Nobuji SAITO (Tohoku University)

Realistic computer graphics simulation of natural scenes has many applications including landscape designing and flight simulation. Since, however, natural, as opposed to artificial, objects such as trees, mountains, and cloud, have an immense variety of irregular shapes, ordinary 3D-modeling methods require huge designing time, large amounts of storage, and consequently large computing time.

In this paper, we present procedure modeling for Zelkova-trees. Since it can generate numerous branching patterns which have natural ramification and look different but are undeniably Zelkova-trees, it is suitable for simulation of tree-lined avenues.

自然の画像生成 —木の手続的形狀定義法—
Simulation of Natural Scenes: Procedure Modeling for Trees

石井 啓資* 千葉 則茂** 齋藤 伸自*

Hiramoto ISHII Norishige CHIBA Nobuji SAITOU

*東北大学工学部 **仙台電波工業高等専門学校

(Tohoku University, Sendai National College of Technology)

Realistic computer graphics simulation of natural scenes has many applications including landscape designing and flight simulation. Since, however, natural objects have an immense variety of irregular shapes, ordinary 3D-modeling methods require huge designing time, large amounts of storage, and consequently large computing time.

We present here procedure modeling for Zelkova-trees. Since it can generate numerous branching patterns which have natural ramification and look different but are undeniably Zelkova-trees, it is suitable for simulation of tree-lined avenues.

1. はじめに

コンピュータグラフィクスによる、山、木、水、火、雲などの自然物（現象）のリアルな画像生成は、フライトシミュレーションや“電子”ロケーション、および都市計画や造園設計などにおける景観図の作成と、多くの応用を持つ重要な課題である。

一般に、コンピュータグラフィクスにおける画像生成は、形状の定義とその描画からなりたつ。通常、形状の定義は人工物、自然物を問わず、多角形面を張合わせて定義（B-rep）するか、基本立体の集合演算として定義（CSG）されており、複雑な形状を定義するためには膨大なデータの入力が必要とする。したがって、自然物（現象）のような複雑な形状を持つものの定義には、少量の入力データとそれを“成長”させるアルゴリズムとで、膨大なデータを生成するような手続的形狀定義法が期待される。

本研究では、自然物として木（特にケヤキ）を取りあげ、その手続的形狀定義法として、形は異なるが特定の樹種に属する木を多量に生成するという“分枝モデル”を考察し検討を行なってきた。また、自然物（現象）の定義される物体空間は大きな奥行き（Z値）を持ち、画像へは透視変換像として寄与するので、どのような形状定義法においても、近くの物体は精密に、遠くの物体は少ないデータで大まかに定義される方が画像生成のコストからいて望ましい。筆者らはこの点については、3次元フレームバッファによる表示法〔青木86〕〔新保86〕により解決できると考えており、分枝モデルの能力には含めないこととした。

2. 木の手続的定義法について

ここでは、木として、ケヤキをとりあげ、その手続的形狀定義法として、分枝モデルを提案する。一般に、針葉樹のように、主軸を持つ樹木は形状も整っており（整形という）、分枝モデルも作りやすい。一方、ウメなどのように主軸をもたず、環境の影響を受けやすいものは形状は複雑で（不整形という）、分枝モデルもつくりにくい。そこで、本研究

では、主軸を持たないが、比較的形状の整っているケヤキを取上げ研究することにより、その形状を定める主な要因は何か明らかにできることを期待し、その分枝モデルを検討することにした。このことから、他の樹木の分枝モデルへと容易に拡張できることが期待される。

木の形状定義法に要求されることとしては次のようなことが考えられる。まず、街路樹の景観の作成のように、形は異なるが、その樹種の特徴を持つものを数多く生成できなければならない。さらに、画像生成のコストの面から視点からの距離に応じた精度で定義できること、すなわち、近くのは詳細に、遠くのは大まかに定義できること。ただし、後者については、筆者らは3次元フレームバッファにより統一的に取扱うことを考えているので、分枝モデルの能力には含めないこととした。前者については、実際の木からその形状データを取り、何らかの変形操作をほどこすことにより、多量の木を作り出すことも考えられるが、一本の木でさえそのデータ量は膨大であり、実物のデータを取ることは、何らかの3次元形状データの自動読取り装置やアルゴリズムが開発されない限り、現時点では現実的ではなく、さらに、その樹種を“はみでない”変形操作を考察することは、同様に樹木の形状に対する研究を必要とするため、ここでは手続的形狀定義法として分枝モデルの考察のアプローチをとった。

これまで提案されている、木の形状定義法のうち静的なものとしては、フライトシミュレータへの応用を目的としたもので、楕円体に合成したテクスチャを張りつけるもの〔Gar 85〕や、1本の木をよりリアルにというもので、木の骨格は与えられることを前提として、その木の幹を太くし、葉を定義し、実際の木からそのテクスチャを取出し張りつけるもの〔Blo 84〕〔Blo 85〕などがある。前者は、リアリティは非常に乏しいが高速な飛行物のフライトシミュレーションには十分であろう。しかし、低速で低空を飛行するもののフライトシミュレーションには、よりリアリティが要求され、これでは不十分である。後者は、ただ1本の木を精密に表現するためならばよいかもしれないが、林や街路樹のように

多量に生成しなければならないものには向かない。
 手続的なものとしては、まず、自然の樹木の造形を成長シミュレーションによって探ろうとする、単純な分枝モデルにもとづくもの〔出原74〕や、生物体の“本質的な”形についての情報はどのように存在し、どのように発現するのかということをも生物学的に探るためのシミュレーションモデルとしての分枝モデル〔本多78〕などがあげられる。ただし、これらはコンピュータグラフィクスを意識したものではないことを注意しておく。本研究での分枝モデルは、研究の手がかりとして後者によるところが大きい。さらに、コンピュータグラフィクスのための分枝モデルということから、“本質的ではないかもしれない”形についてもリアリティをもつことや、さらに前述したように、特定の樹種であると認識できる木を多量に生成できることが要求される。コンピュータグラフィクスのための手続的なものとしては、枝や葉などの“部品”を手続的に結合して木を合成するもの〔HWC 80〕、生成文法によるもの〔Sm i 84〕、確率的な位置や属性をもつパーティクルと呼ぶ多量の微小片や、それを掃引したものの集合として定義するもの〔Ree 83〕、および、分枝モデルにもとづくもの〔AK84〕などがあげられる。最初にあげたものは非常にリアリティに乏しい。次にあげたものは、生成される植物に意外性は期待できるが、特定の実在の樹種を生成することはほとんど期待できない。3番目にあげたものは、林などのように、多量の木を生成するのに向いており、かなりリアリティの高い画像を生成することに成功している。ただし個々の部品は抽象的な形状をしているためクローズアップには向かない。最後のものは、種々の樹種を容易に生成できるように、いくつかのパラメータをもつ分枝モデルをもった生成システムである。しかしながら、特定の樹種の木を、異なる形をもつものとして多量に生成することはできそうにない。
 本研究では、ケヤキをとりあげ、これまでに述べてきた形状定義法に要求されることとを満たすような、木の骨格を与える分枝モデルについて検討を行ってきた。

3 木の手続き的形狀定義法

何の木であるかを印象的に知るのに役立つような外形を樹貌という。樹貌は主として、枝序（枝の派生する状態）と樹冠（枝葉により形づくられる空間的輪郭）によって定まる〔上原77〕。したがって、よい分枝のモデルを考案することは木の画像生成において重要な課題であるといえよう。

樹木の分枝の代表的なものには、二又分枝と側方分枝があるが（図3.1）、ケヤキは二又分枝であるので、二又分枝モデルを考えていく。ここでは、これまで行なったモデルの改良順にしたがって説明する。

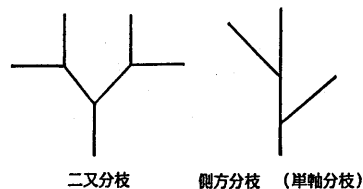


図3.1 二又分枝と側方分枝

3.1 単純分枝モデル

単純分枝モデル：

〔本多78〕と同様、次のような仮定をおいてみる。

- 仮定1. 親の枝と2本の子の枝は同一平面上にある。
- 仮定2. 親の枝は3本の枝がのっている平面の最大傾斜線となっている。
 また、分枝角については、ケヤキに対してはかなり確からしい次の仮定をおく。
- 仮定3. 2本の子の枝は親の枝に対して、同じ角度で分かれる。
 分枝の長さについては、ここでは最も単純な次の仮定をおく。
- 仮定4. 2本の子の枝の長さは親の枝の長さに等しい。

これらの仮定については図3.2を参照。

単純分枝モデルにしたがい、分枝角は実際のケヤキの観察から、分枝のレベルが深くなるにつれ15度から1度ずつ増加させることとし、レベル6までの分枝を行った結果を図3.3に示す。

ケヤキの樹冠は盃形に属する〔上原77〕が、この結果は余りにも上部が平らで異様である。図3.4に典型的と思われるケヤキの写真を示しておく。

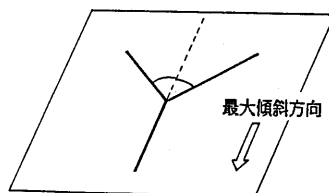


図3.2 単純分枝モデル

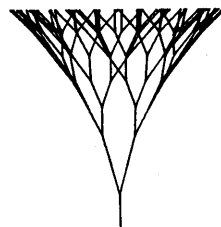


図3.3 単純分枝モデルによる形状



図3.4 典型的な自然のケヤキ

3.2 強弱分枝モデル

ケヤキを良く観察すると、分枝した2つの枝の太さには差があり、細いほうは長くのび、太い方は短いということがよく見うけられる(図3.5)。これは、分枝した2つの枝に潜在的に何か、成長の強弱があり、強い枝は弱い枝より分枝が速く起ると考えることができ、このことより強い枝の先端には弱い枝よりより多くの枝葉がつくことになり、養分の輸送能力も高くなければならず、枝の断面積が大きくなる。すなわち、枝が太くなると考えることができる。[本多78]に同様の指摘があるが、強い方の枝は一般に長いとしている点で異なる。

次に、このような“強弱”を考慮したモデルを考えてみる。

強弱分枝モデル：

単純分枝モデルの仮定1, 2, 3についてはそのまま継承する。

仮定5. 分枝した枝には一定の比の強弱がある確率で発生する。

ここで、一定の比としたのは、主要の強弱の比がシミュレーションにより明らかとなることが期待されるからである。木全体の成長量を与える全エネルギーを考え、そのエネルギーは枝の強弱に比例して配分されるものとし、ある一定量以下となった枝については分枝は起らないものとする。また、強弱の比は1:1から1:9までとし、対応する枝の長さの比は、とりあえず1:1から3:1となるようにした。従って、強弱の比が $e_1 : e_2$ の場合は、枝の長さの比を $1/e_1 : 1/e_2$ とした。図3.6にこの強弱モデルにしたがった分枝の様子を示す。(a), (b), (c)は強弱の比が6:4で(d), (e), (f)は7:3の場合である。たとえば、7:3が確率 $1/3$ で起るということは、2つの分枝の強弱7:3と3:7となる場合を合せて $1/3$ 発生するということであり、他の分枝は1:1の強弱比を持つということである。



図3.5 分枝の強弱

枝の長さの違いや、エネルギー切れによる分枝の停止により、木の上部はややランダムな形になり、当然のことであるが、強弱比7:3の方がその傾向が強くなり、さらに、発生確率を高くするとその傾向が強くなる。それでは、どれが一番ケヤキに近い分枝をしているのだろうか。

そこで、ここでは分枝のトポロジカルな複雑さを表わす“分枝比”により、実際のケヤキと比較してみた。分枝比はもともと、河川の流れにストレーラーの方法により次数を付けたときの、1次の流れの数と2次の流れの数との比、2次と3次の比・・・をいう。

ストレーラーの方法は、河川を例に挙げると、

- (1) まず、源流を1次とする。
- (2) n 次の流れ同士が合流した場合は、そこからは $n+1$ 次の流れとなる。(例えば、1次と1次同士が合流すると、そこからは2次の流れになる。)
- (3) 異なる次数の流れが合流した場合は次数の大きいほうが続く。(例えば、1次と2次が合流したら、2次の流れが続き、1次の流れはそこで終わる。)

というように、源流から次々と次数を定めていく。

この分枝比をいくつかの樹種について調べたところ約4であり、木一般に成立つことではないかという報告がある[高木78]。しかしながら、筆者らの調査では、ケヤキについては、約2.6であった。これは、筆者らの測定のまずさによるものかどうかはわからないが、ここでは2.6を採用することとした。分枝モデルによるケヤキ(図3.6)については表3.1に示すような結果が得られた。

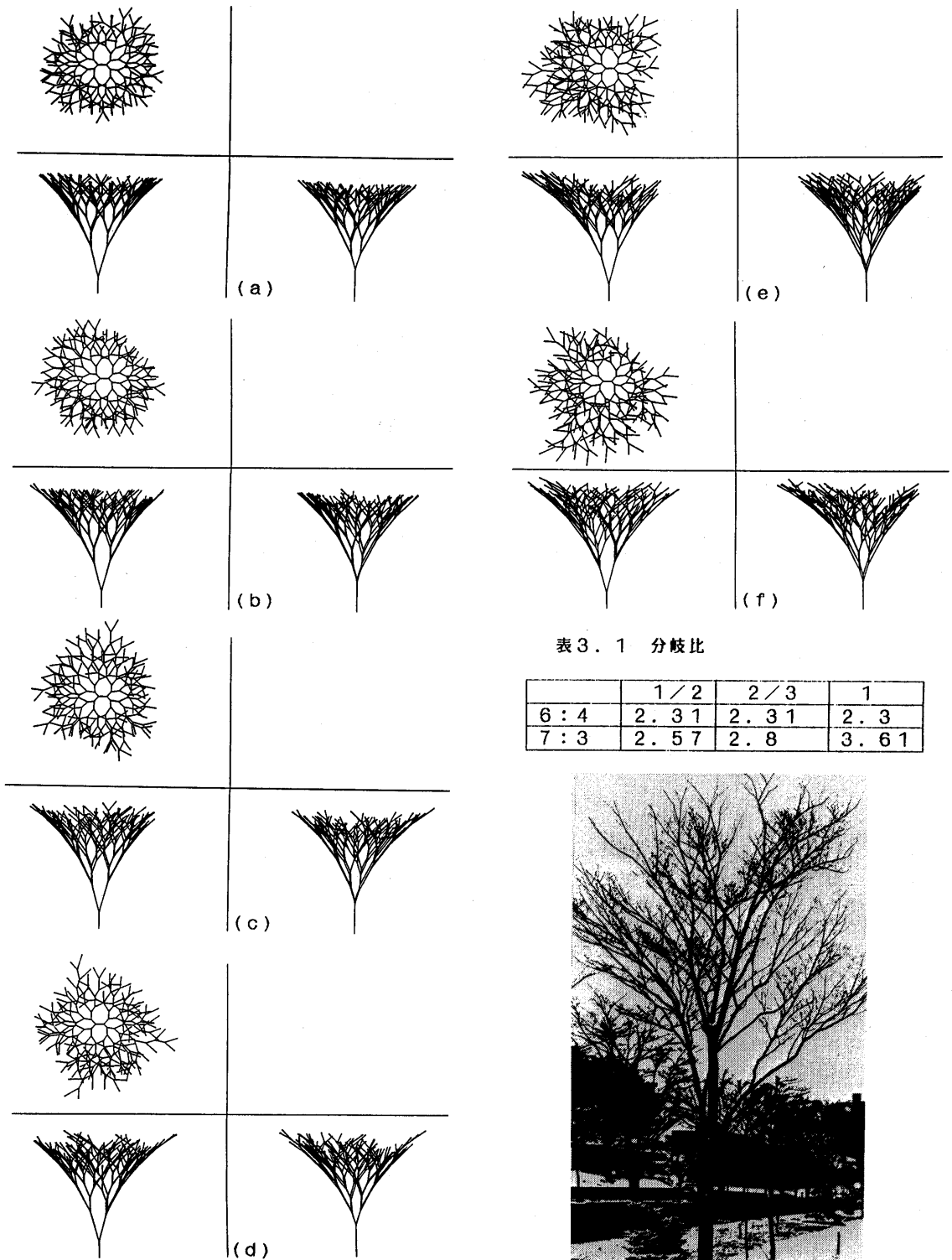


図3.6 強弱分枝モデルによる形状

表3.1 分岐比

	1/2	2/3	1
6:4	2.31	2.31	2.3
7:3	2.57	2.8	3.61

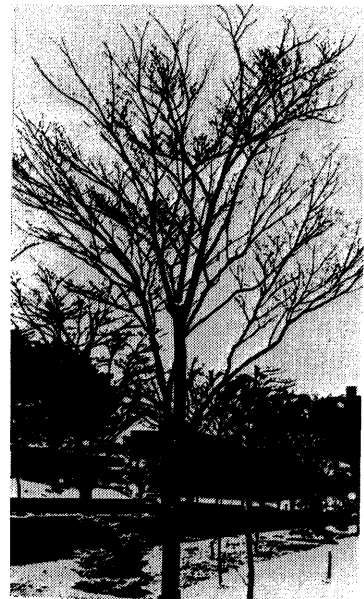


図3.7 自然のケヤキ

したがって、トポロジカル的には図3.6(d)の強弱比が7:3で発生確率1/2がケヤキに近いと言えそうである。

しかしながら、この強弱モデルにより生成された木はどれも、“すり鉢”状になり樹冠の中央部に枝が現れない。仮定2をおく限りこの傾向はまぬがれない。自然のケヤキではこのようなことはない。自然の木では太陽光を受けやすい形に、さらに枝の混雑を避ける形に成長すると考えるのが自然であり、これらの生成された木は“不自然”であるといわざるを得ない。

3.3 ねじれ分枝モデル

ケヤキを観察していると、2又分枝であり、主軸はないが、何か、中央部に垂直に伸びる太い主軸があるような印象を受ける。(図3.7)これは、強弱に分枝したときに、強の太い枝の方が垂直に伸びる傾向があるためであると考え、仮定2を捨て、“ねじれ”の仮定を新たに導入した。

ねじれ分枝モデル：

仮定1, 3, 5はそのまま継承する。

仮定6. 強弱に応じて、ある一定の角度だけのねじれが起る(図3.8)

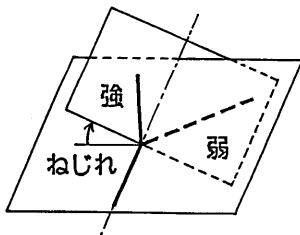


図3.8 ねじれ

図3.9に枝の長さは等しくし、強弱をランダムに起こし、ねじれだけをいれてみた結果を示す。ねじれ角が大きくなると、樹冠は丸みをおび、かなり自然に近くなることがわかる。図3.10には、枝の長さも強弱に応じて変えるねじれ分枝モデルによる結果を示す。分枝比の一番良かったものにねじれを適用してみた。弱の枝が強枝よりも長くなると仮定しているので、ねじれの樹冠の丸みに対する効果はやや薄れているのがわかる。印象だけから言うと、ねじれ30度~40度がよりケヤキらしいと思われる。

しかしながら、実際のケヤキとはかなり“枝ぶり”の違いが感じられる。これは、自然のケヤキには、日射量や風などの自然によるものや、せんでいなどの人工によるものなどかなりの“枝おれ”が発生しているためであると思われる。図3.11に枝おれをランダムにいれてみた木を示す。“枝ぶり”に置いては、かなりそれらしいと言えるのではなかろうか。次節で、枝おれを考慮した分枝モデルを示す。

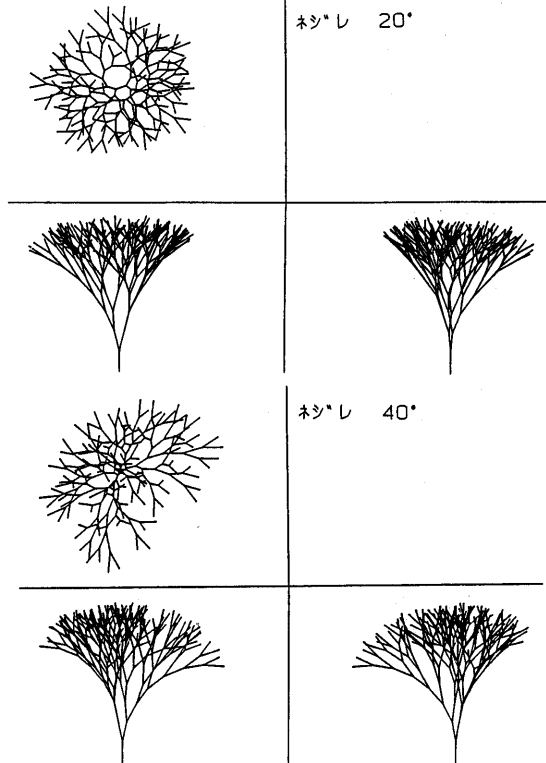


図3.9 ねじれにより生成された形状

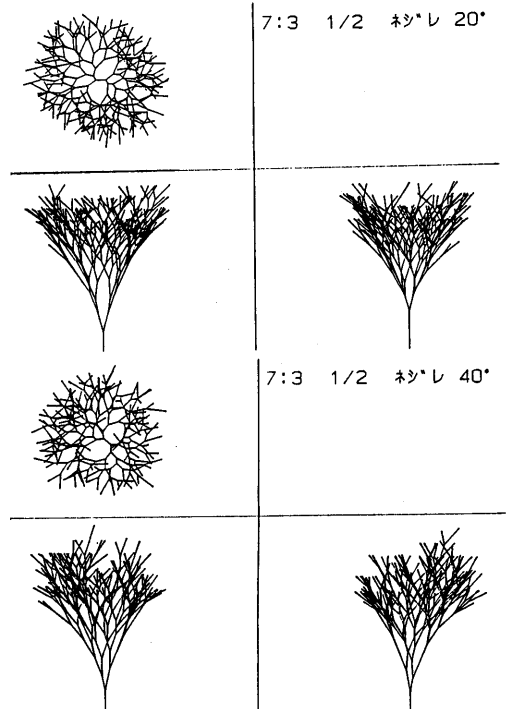


図3.10 ねじれ分枝モデルによる形状

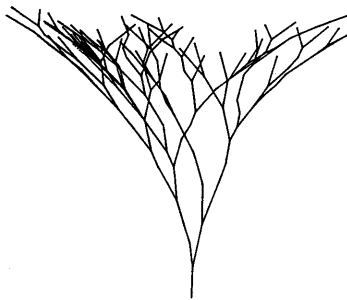
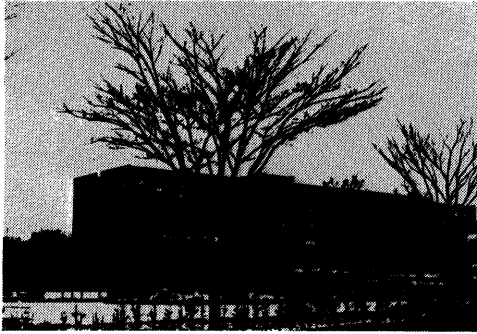


図3.11 “枝折れ”の導入

3.4 枝折れ分枝モデル

さらによくケヤキを観察すると、ケヤキの枝は直線からなるのではなく、曲りくねったものが多い。また、その折れ曲り方を見ると、どれもほぼ一定の間隔を持つように思われる。つまり、今までは、分枝と分枝との間を全て一本の枝と考えていたが、これは、実は、単位となる枝が成長の過程で分枝の一方が折れる、すなわち“枝折れ”によって、数本連続し、長い枝になったものと考えられる。

これまでのモデルでは、各枝に分配されたエネルギーがある一定値以下になったら成長を止めていた。そうすると、弱い枝の列は下方に、かつ、成長が短くなるため、実際の本であれば、その枝には光があたりなくなり、結局枯れてしまうことになる。ケヤキはどの先端の部分も、一年のうちに枝の単位長だけ成長すると考えられ、もし光があたらないなどの理由で分枝できない枝があれば、それは光があたるどころまで伸びてから分枝しようとするのが自然である。そこで、新しいモデルでは、枝の単位長さを1レベルとし、レベルの単調減少関数を閾値として、枝のエネルギーがその値より小さいときは、枝折れを発生させるようにした。また成長は途中で止めず、21レベルまで成長させることにした。この、21レベルは、実際のケヤキ(成木)より枝折れの痕跡から得たものである。

また、分枝した直後に、“枝折れ”が発生した場合、時間がたつにつれ、残った枝の角度が真直ぐ近くに戻る、つまり“枝折れ”の新旧によって角度が異なることも予想される。さらに、今までのモデル

では枝の強弱によって、ねじれを与えていたが、垂直に近い分枝がねじれるのは、強い枝が上方へ向って伸びていくのに必要であると考えられるのに対し、水平に近くなった分枝が上下方向にねじれるのは、物理的観点からも、あまり妥当ではないと思われる。

枝折れ分枝モデル：

仮定1, 3はそのまま継承する。

仮定4を再び採用する。

仮定7. 分枝した枝には, 0.05:0.95, 0.15:0.85, … 0.95:0.05の強弱がある決まった確率分布に従って発生する。

仮定8. 分枝した結果, エネルギーが閾値関数 α^{-l} (α : 1より大きい定数, l : 分枝のレベル)より小さくなったときは, 枝折れが発生し, 弱いほうの枝が折れる。その場合には, エネルギーは残った枝に全て伝わる。

仮定9. 枝折れが発生した場合, 残った枝の分枝角は, 根元に近い所ほど余計に戻る。

仮定10. 親の枝が垂直方向から30度以上傾くとねじれの角度が15度になり, 傾きが60度以上の場合はねじれない。

閾値関数 α^{-l} の底 α は, 分枝から分枝までの枝の列の長さに関わるパラメータである。定性的には, α が大きくなると, 枝の列の長さの期待値は小さくなる傾向がある(図3.12)。エネルギー比が0~1で一様分布するときには, 枝の列の長さの期待値は $1/\log \alpha$ となる。

図3.12に枝折れ分枝モデルのパラメータを様々に変化させて生成を行なった結果を示す。強弱の確率分布について, 一様分布と, 近似正規分布との両方により, それぞれ生成を行ない, 分岐比を調べたところ, 一様分布の方が約2.7, 近似正規分布の方は約2.3となり, 3.2節の記述から, トポロジ的には, 一様分布の方が実際のケヤキに近い。一般に, エネルギーの分配比が極端になる確率が高くなるほど分岐比は大きくなる傾向があるようである。

図3.13に, 最良と思われる, 次のようなパラメータによる枝折れ分枝モデルで生成した6本の木を示す。

エネルギー比: 一様乱数による

$\alpha = 1.3$

枝折れの時, ねじれは発生させない

パラメータは同一であり, 確率的要素は強弱の発生のみである。特定の樹種の本を多量に生成できる可能性を示していないだろうか。

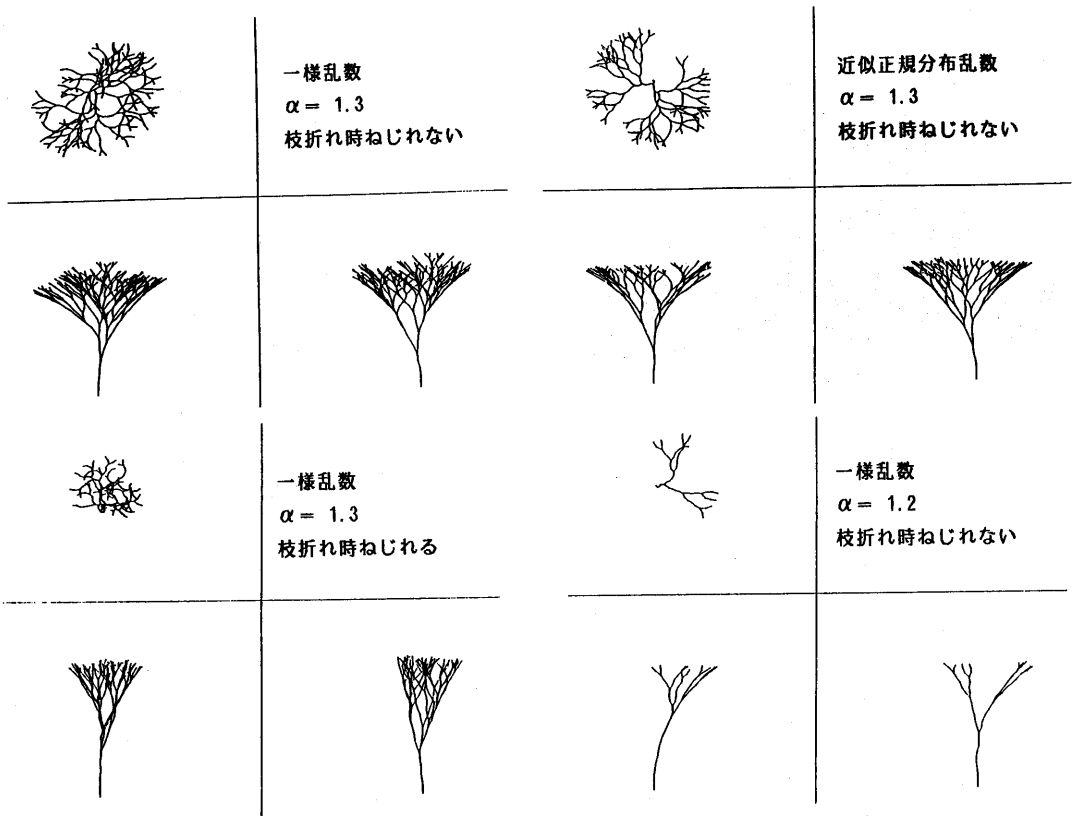


図3. 12 枝折れ分枝モデルによる形状

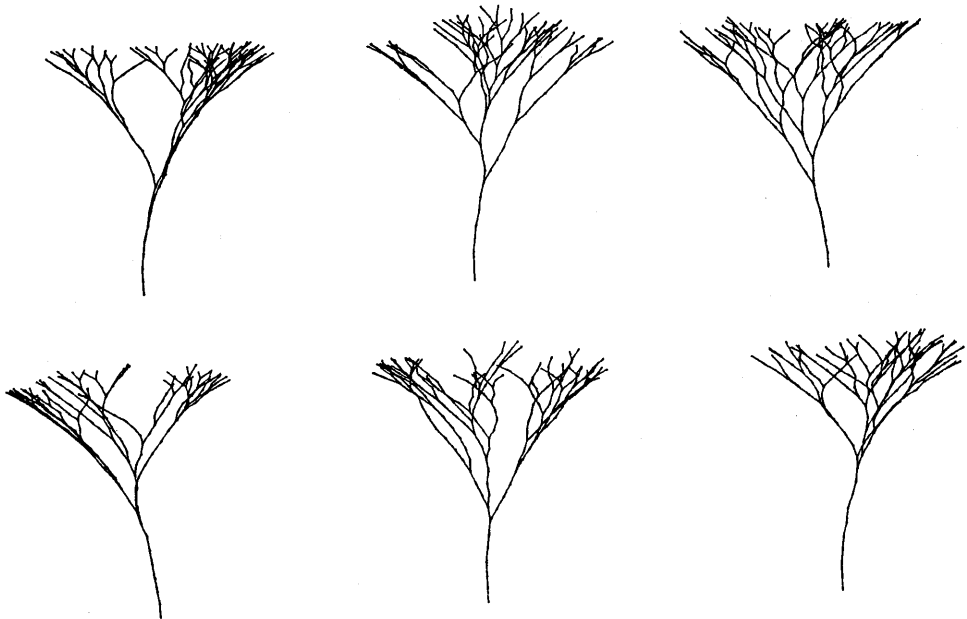


図3. 13 同一パラメータによる6本の木

4. 今後の課題

図4. 1に示すように、個々の自然のケヤキの形の違いは第1分枝のしかたに大きく左右されているので、第1分枝のしかたについてモデルの強化が望まれる。

枝折れ分枝モデルで生成した木の平面図を見ると(図3. 12)、穴があいたように枝が存在しない場所がある。これは太陽光の影響や、枝葉の混雑の影響をモデルに取り入れることにより解決することができるであろう。太陽光の影響については、現在次のようなモデルを考え検討中である。図4. 2のように、あるレベルの枝から先についている葉群を1枚の長方形で近似し、全ての枝についてそれらの重なりを求め、その結果により以降の生成を次のように修正する。

修正アルゴリズム：

- 高々、cとdの部分が影となる場合、
そのまま成長を続ける。
- a (b) が影となりb (a) が影とならない場合、
以降の分枝を右 (左) よりに修正する。
- aとbが影となりcとdが影とならない場合、
成長を止める。
- a, b, c, dとも影となる。
この枝を折る。

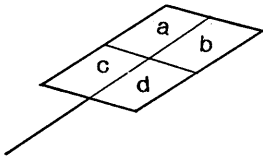


図4. 2 太陽光モデル



図4. 1 第1分枝の異なるケヤキ

骨格のモデル化が終われば、肉付けや葉の生成をどのように行なうのかということや、樹皮を、どのように表現したら良いかということも重要な課題として残されている。肉付けについては、3次元フレームバッファ上で、画像処理的手法により実現できるのではないかと考えている。

5. まとめ

ケヤキの分枝モデルを改良順に示した。

枝折れ分枝モデルにより、ケヤキの枝ぶりが、かなり“それらしく”表現でき、多量の、形の異なるケヤキの木が生成できる事を示した。

また、今後解決しなければならない課題についても触れた。

謝辞 日頃、御討論頂く東北大学西関隆夫助教授に感謝致します。

なお、本研究の一部は文部省科研費(奨励研究(A) 60750310)の補助による。

参考文献

- [高木78] 高木隆司, 「かたち」の探究, ダイヤモンド社, 1978.
- [上原77] 上原, 樹木の総論と観賞, 加島書店, 1977.
- [出原74] 出原, 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, 1974.
- [本多78] 本多, 樹木の幾何学模型, 数理科学, 184, 1978.
- [本多78] 本多, 樹木の分枝, 数理科学, 221, 1978.
- [青木81] 青木富雄, 3次元フレームバッファによる形状定義に関する研究, 東北大学工学部卒業研究.
- [新保81] 新保賢津雄, 3次元フレームバッファによる画像生成に関する研究, 東北大学工学部卒業研究.
- [AK84] M. Aono and T. L. Kunii, Botanical tree image generation, IEEE CG&A, May, 1984, pp.10-34.
- [Ath81] P. R. Atherton, A method of interactive visualization of CAD surface models on a color video display, Computer Graphics, 15, 3, 1981, pp.279-287.
- [Blo84] J. Bloomenthal, A representation for botanical trees using density distributions, Proc. of ICECG'84, pp.571-575.
- [Blo85] J. Bloomenthal, Modeling the mighty maple, Computer Graphics, 19, 3, 1985, pp.305-311.
- [FGR85] G. Frieder, D. Gordon, and R. A. Reynolds, Back-to-front display of voxel-based object, IEEE CG&A, January, pp.52-60.
- [Gar85] G. Y. Gardner, Visual simulation of clouds, Computer Graphics, 19, 3, 1985, pp.297-303.
- [MWC80] R. Marshall, R. Wilson, and W. Carlson, Procedure models for generating three-dimensional terrain, Computer Graphics, 14, 3, 1980, pp.154-162.