

植物の生長 / 非生長モデル  
— 環境の影響の非生長的表現に向けて —

乃万 司

九州工業大学情報工学部

樹形の生成において、環境の影響を与えるために、従来は、環境と相互作用させながら生長過程をシミュレートする生長モデルが用いられてきた。しかし、生長モデルには、生成される樹形の子測が困難であり、計算時間もかかるという問題がある。本研究では、生長過程とは無関係に、樹形に環境の影響を与える非生長モデルを提案する。利用者が与える見本の樹形から自然な樹形への変形には、受光量不足による枝枯れを表現する枝枯規則と向日性による樹形を表現する向日規則を用いる。環境要因としての光量を評価するためには、ボクセル空間法を用いる。

GROWTH/NON-GROWTH MODEL OF BOTANICAL OBJECTS  
—Towards Non-Growth Representation of Environmental Effects—

Tsukasa Noma

Faculty of Computer Science and Systems Engineering

Kyushu Institute of Technology

Kawazu, Iizuka, Fukuoka, 820 JAPAN

To generate the shape of trees with the effects of their environment, growth models have been proposed, where the tree growth process is simulated with the interaction between environment and trees. The growth models, however, have two problems: the difficulty of prediction of final tree shape and its computational cost. This article proposes a non-growth model, where the environmental effects are produced on the tree shape independent of its growth process. To modify the trees into natural ones, we use two rules: branch death rule and heliotropism rule. To estimate illumination, a voxel space method is adopted.

## 1 はじめに

植物の画像生成は、CGによる景観シミュレーションの要素技術としてきわめて重要である。特に樹木の場合は、汎用性の面から、3次元形状データをもとに画像が生成されることが望ましいため、形状データの生成には従来から様々な手法が提案されている。

樹木あるいは樹木群を景観中に配置する場合は、画面に“溶け込ませる”すなわち違和感のない形状で表示することが必要である。そのためには、樹木間の相互作用を含め周囲の影響を考慮した形状データ、さらには環境を考慮した樹木形状生成モデルが必要となる。

従来そのようなモデルは、環境と相互作用させながら生長過程をシミュレートするいわゆる“生長モデル”によっていた。しかしながら、例えば利用者の意図する景観を表示する場合、生成される樹木の形状が予測困難なため、生長モデルは用いにくい。これは、群生した樹木を画面に配置しようとした場合に特に問題となる。また、複数樹木間の影響を生長の各段階で考慮するため、樹林などを生成する場合は計算時間がかかる。

本稿では、上記の問題を解決するために、現実には環境との相互作用を伴う生長により獲得した樹木の形状を非生長的に表現することを試みる。

## 2 生長モデルと環境との相互作用

手続き的に樹木の3次元形状を定義する従来の手法は、枝や葉の分布を確率的に定める手法を除くと、樹木の生長にならったものである[千葉89]。初期のそれら“生長モデル”<sup>1</sup>にお

<sup>1</sup>ここでは、[千葉89]の定義する“生長モデルのようなもの”と生長モデルをともに含む。

いては、分枝形状を環境の影響を考慮せずに表現するものであった[Aono84][Smith84][Oppenheimer86]。

さらに、より現実感のある樹形を得るために、環境と相互作用させながら生長過程をシミュレートするモデルが提案された[奥村86][金丸88][中嶋88][千葉90][安居院91]。このように、生長過程をシミュレートしようとするのは、“一時点での形状でもリアリティさを求めるとそれまでの歴史をたどることが最も可能性のある手法だと思”われたからであり[千葉89]、同時に、こうした生長モデルは、植物の形態形成の原理[奥村86]や森林生態系の遷移のメカニズム[國井91]を探るといった自然科学的関心にも適合するものであった。

しかしながら、このような生長モデルにはいくつか問題がある。

1つは、井上ら[井上90]が指摘するように、景観シミュレーションなどで樹木を生成する場合に、利用者が生成したい樹木の形状を得にくい、言い替えると、利用者にとって最終的な樹木の形状が予測困難であるという問題である。

[井上90]は、これを解決するために、外形を含む形状制御パラメータにより樹木生成を行なう手法を提案した。しかし、[井上90]の手法では環境に対する考慮がなく、また、あくまでも単一の樹木の形状データを生成する手法にすぎない。

生成される樹形が予測困難であるという問題は、むしろ群生など複数樹木の場合に顕著に現れる。生長過程で環境がどのように樹形に影響するかが予測困難であるから、景観シミュレーションで利用者の意図する“茂み”を生成するには、何度も条件を変更して生長を繰り返すしかない。

2番目の問題は、計算時間である。特に樹

林の場合は、ある程度安定した状態に達するまで、各生長ステップ毎に各樹木の環境条件を計算し次のステップへと進めていくために、膨大な計算時間が必要になると予想される。しかも、より正確にシミュレートするためには、生長ステップ幅を狭めることも期待される。

### 3 環境の影響の非生長的表現

ここで、前節で指摘した生長モデルの第1の問題すなわち樹形の予測困難性について検討する。ユーザインタフェースの面からすると、利用者は、見本として樹木を適当に配置し(この配置は多少不自然でも良い)、システムは、その見本に近い自然な樹形を生成すればよい。

そこで本稿では、次の手法を提案する。

- (1) 利用者は樹木の見本を適当に配置する。
- (2) 現在の環境を評価し、樹木の形状を環境に影響された形状に 非生長的に 変形する。

同時に、この手法は、前節で指摘した第2の問題すなわち計算時間の面でも有利であると考えられる。なぜなら、最終的な樹木(群)の形状は、種(あるいは苗)の状態である生長モデルの初期状態よりも、利用者が与えた見本の状態の方がはるかに近いので、生長による変形よりも上記の非生長的変形の方が少ないステップ数で可能であると考えられるからである。

### 4 ボクセル空間による環境モデル

奥村ら[奥村 86]が指摘するように、数多くの環境要素のうち、“光”のみが樹形に影響を与える。そこで、本稿でも、環境要素として光のみを考える。

#### 4.1 ボクセル空間

光を環境要素として用いるためには、まず、空間内の任意の点における光量を評価する必要がある。光量を評価する手法としては、

- (1) 地面に垂直な平行光線で評価する [中嶋 88] [安居院 91].
- (2) 光天球(天空の仮想半球面)の全方向からの光線で評価する [奥村 86][金丸 88].

の2つが提案されている。

(1)の手法は、孤立した樹木の場合には有効であるが、群生した樹木の内部の枝が枯れ落ちるといった現象は、横からの光を考慮しないと説明できないため用いることはできない。

(2)の手法は、樹木の枝先についた葉あるいは葉の集りを球(遮光球[奥村 86]または葉球[金丸 88]と呼ぶ)で近似し、これら葉球の相互の遮光度合を投影によって計算するものであった。この場合、葉球の数を  $N$  とすると、全葉球の光量評価には  $O(N^2)$  の計算を必要とするため、葉球数が増大すると計算時間がかかる。

そこで本稿では、Green[Green89]の提案したボクセル空間法<sup>2</sup>を応用する。後述するように、ボクセル空間法による光量評価は計算量の面からも比較的良好な性質を有している。

ボクセル空間法では、空間全体をボクセルと呼ばれる単位立方体に分割する。樹木の枝先点に葉があるとし、枝先点の属するボクセルには一定の割合で遮光度を加える。1つのボクセル内は単一の遮光度を持つとする。

<sup>2</sup>[奥村 86]では、遮光球を単位立方体であるボックス空間で分類し、受光量を評価する遮光球の属するボックス空間以外では、ボックス空間中の全遮光球をそのボックス空間の中心にある1つの遮光球で近似するという処理を行なっている。これは、ボクセル空間法に近い考え方であるが、光量評価にはやはり遮光球への投影を用いている。

## 4.2 ボクセル空間における光量評価

ボクセル空間内の任意の点における光量を評価するために、その点から光天球に向けて(異なる方向へ)複数の光線を発する。各光線の発射はサンプリングに相当する。

Green[Green89]は、単純に、占有された(葉の存在する)ボクセルと交差すると光線を止め、例えば、100本のサンプル光線を放射し、そのうち40本が止められると露出は0.6という具合に光量評価を行なった。本稿では、各光線がボクセルと交差する毎にそのボクセルの遮光度によって光線の強度を減じていくという方法でより正確な光量評価を行なった。

なお、光線と交差するボクセルは、ラスタグラフィクスで直線描画に用いられるDDA(Digital Differential Analyzer)アルゴリズムを3次元空間に拡張した3DDDAアルゴリズムによって順次求めることができる。これは、Fujimotoら[Fujimoto86]が、レイトレーシングの高速化に用いたものである。

空間内のボクセル数を  $K$  とすると、1本の光線の評価に要する計算は  $O(K^{\frac{1}{3}})$  であり、各ボクセルで放射するサンプル光線の数を一一定すると空間内の全ボクセルの光量評価に要する計算は  $O(K^{\frac{1}{3}})$  ですむ [Green89]。

なお、本稿では、光天球の方位角を12等分、高度角を3等分し、1ボクセル当り36本のサンプル光線を放射し、光量評価を行なっている。

## 5 変形規則

変形規則としては、現在、“枝枯規則”と“向日規則”の2つの規則を考えている。これらの規則は、見本の樹形を環境に影響された樹形に非生長的に変形するために用いられる。

## 5.1 枝枯規則

枝先の葉は、光を受け、樹木の他の部分に養分を供給する。しかしながら、十分な光を受けられないと、その枝は枯死する。

本稿では、先端の枝(の葉)は、途中の枝も養うとの仮定のもとに、次の規則で枝枯を決定している。ある部分木について:

$$\frac{T}{N} < threshold$$

$T$ : 部分木の枝先点の総受光量

$N$ : 部分木の総枝数

$threshold$ : 枝枯を決定する閾値

が成立するとき、その部分木を枯死させる。

この規則は、生長モデルにおいて、[奥村86]の“枯死限界光量による枝の枯死”、[中嶋88][安居院91]の“日照射量による枝の除去”、[金丸88]の“枯死しきい値による枝折れ”等に相当するものである。

## 5.2 向日規則

樹木の各枝はよりよい環境、いいかえるとより日照のよい場所を求めてその方向を変える性質がある。これを向日性と呼ぶ。現実には、向日性による枝の方向付けは、生長の各段階で行なわれているはずである。これを、非生長的な変形で表現するために、次のような規則を採用した。

各枝について、そのすべての子孫からなる部分木全体を、その枝のつけねの点を中心に回転させる。回転の向きはその部分木の(枝先点の)総受光量が最も増えると期待される向きとし、回転角は総受光量の期待増分に応じて決定される。具体的には、現在は次のような評価方法を用いている。

(1) 部分木の各枝先点について

(1a) ボクセル空間を差分の格子点とみなし、差分商で各軸方向の明るさの変化を求める。

(1b) (1a) のベクトルに回転中心と枝先点との距離をかける。

(2) (1) で求めた各枝先点のベクトルを平均する。

(3) (2) で求めたベクトルを部分木の根の枝ベクトルに垂直な平面に投影する。

(4) (3) で求めたベクトルと部分木の根の枝ベクトルと共に垂直な軸を中心に、(3) で求めたベクトルの長さから求めた回転角<sup>3</sup>で回転させる。

なお、この回転は、樹木全体では、根に近い枝から順に適用される。

この規則は、生長モデルにおいて、[奥村 86]の“蔓性”，[中嶋 88][安居院 91]の“分枝角度の修正”，[千葉 90]の“向日性”等に相当するものである。

## 6 実験結果

あらかじめ2分枝モデルで生成した樹木の3次元形状を見本として、 $5 \times 5 = 25$ 本を格子状に配置した。見本の樹木は、環境の影響もランダムな量も導入していないので、全く同一の形状をしている。

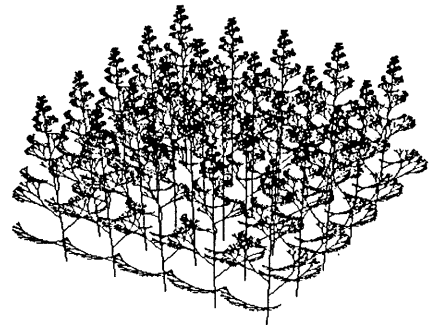


図1. 枝枯規則を適用した樹木群

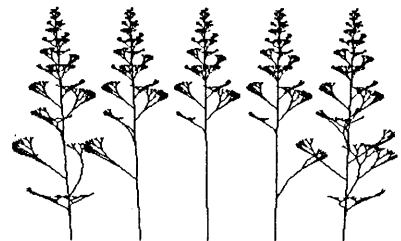


図2. 枝枯規則を適用した樹木群 (第3列)

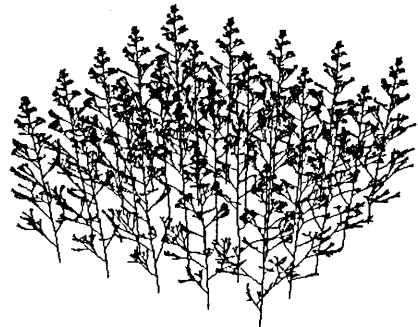


図3. 向日規則を適用した樹木群

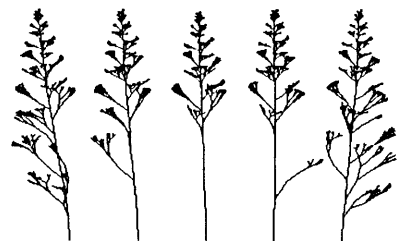


図4. 向日規則を適用した樹木群 (第3列)

<sup>3</sup>次節の例では、ベクトルの長さを  $L$ 、部分木の枝先点数を  $N$  として、 $\sqrt{\frac{L}{N}} \times \text{constant}$  としている。

これらの格子状の樹木群に 5.1 節で述べた枝枯規則を適用したものを図 1 に示す。その第 3 列の 5 本の本を横から表示したものを図 2 に示す。樹林内部の枝枯れの様子が表現されていることがわかる。

さらに、5.2 節で述べた向日規則を適用したものが図 3 である。同様に第 3 列の 5 本の本を横から表示したものを図 4 に示す。向日性によって樹木(枝)が明るい方向を向いている様子が表現されている。

## 7 検討

### 7.1 外部環境の導入

奥村ら [奥村 86] は、建物や地面の高低差など光を遮る“固定型障害物”を外部環境としてモデルに導入している。光量評価においては、遮光球にその障害物を固定的に“焼き付ける”ことで計算を行なっている。本稿のモデルでは、障害物の存在するボクセルの遮光度を高めれば(通常はボクセルを完全遮光にすれば)障害物による影響を扱うことができる。

### 7.2 見本樹木

見本とする樹木は、周囲に遮光物のない環境での樹形を用いるのが望ましい。ただし、この樹形データは、6 節の実験のように何らかの手続き的方法で生成してもよいし、また、実際の樹木から採取されたデータあるいは人間が作成したデータを用いてもよい。

### 7.3 樹木の個体差

本稿で述べた非生長モデルは、環境の影響を樹形に反映させるものであった。しかしながら、実際にはほぼ同一の環境であっても、樹形には個体差があり、それが画面に一種の自然感

を与えることになる。この個体差に関しては、本稿の手法は扱っておらず、例えば見本樹木の段階で、樹形データに何らかの個体差を与える等の工夫が必要であると考えられる。

### 7.4 草本への適用

草本の場合は、樹木に比べその形態に個体差があまりなく、L-system のような Parallel Rewriting System の単純な適用でも十分に実感的な個体の形状データが作成可能である [Prusinkiewicz88]。したがって、本稿の手法を用いることにより、それぞれの草が光を求めて生えている草の茂みなどを表現することが可能であると考えられる。

### 7.5 生長モデルと非生長モデル

従来の生長モデルと本稿で述べた非生長モデルは相対するものではなく、相補的に用いることができる。例えば、7.3 節で述べたように、本稿のモデルには、樹木に直接個体差を与える方法はない。逆に、従来の生長モデルでは、同一環境でも個体差を生じさせる手法を種々提案している [奥村 86][金丸 88] [中嶋 88] [千葉 90] [安居院 91]。

したがって、例えば、従来の生長モデルで周囲に遮光物のない環境での樹形データを生成し、それらの見本樹木を利用者が適当に配置し、本稿の手法で環境の影響を加えることも可能である。

## 8 むすび

本稿では、樹形に対して環境の影響を非生長的に与えるモデル、“非生長モデル”を提案した。枝枯規則および向日規則によって、受光量の少ない枝の枯死や向日性の影響が表現され

ることを示し、本モデルの有効性を確認した。さらに、従来の生長モデルとの相補的な利用についても論じた。

今後は次の2点の検討を試みたい。

1. 樹形に対する負要因としての枝枯規則の他に、正要因として、受光量に応じて枝を伸長させるといった規則(伸長規則)[Green89]の非生長的な適用を考える。
2. 変形規則を繰り返し適用することによって、全体の樹形は安定な状態に向かうと考えられる。規則を繰り返し適用する手法と安定度の評価方法について考える。

## 謝辞

日頃より御指導、御討論をいただいている九州工業大学情報工学部岡田直之教授に感謝致します。

## 参考文献

- [安居院 91] 安居院, 福田, 中嶋: 景観表示のための樹木の生成手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 32, No. 5, pp. 618-625 (1991).
- [Aono84] Aono, M. and Kunii, T. L.: Botanical Tree Image Generation, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol. 4, No. 5, pp. 10-34 (1984).
- [千葉 89] 千葉: 樹木・草本の生成に関する研究動向, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会資料, 89-CG-40 (1989).
- [千葉 90] 千葉: 樹木と岩, *PIXEL*, No. 93, pp. 115-120 (1990).
- [Fujimoto86] Fujimoto, A., Tanaka, T. and Iwata, K.: ARTS: Accelerated Ray Tracing System, *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol. 6, No. 4, pp. 16-26 (1986).
- [Green89] Green, N.: Voxel Space Automata: Modeling with Stochastic Growth Processes in Voxel Space, *Comput. Graph.*, Vol. 23, No. 3, pp. 175-184 (1989).
- [井上 90] 井上, 江島, 小谷, 宮原: 様々な自然物に適用できる樹木の形状定義法, グラフィクスとCADシンポジウム, pp. 157-166 (1990).
- [金丸 88] 金丸, 千葉, 斉藤: CGのための樹木の生長モデル, *NICOGRAPH 論文コンテスト*, pp. 30-38 (1988).
- [國井 91] 國井: ビジュアルコンピュータによる4次元世界のシミュレーション, *PIXEL*, No. 106, pp. 161-175 (1991).
- [中嶋 88] 中嶋, 福田, 安居院: 景観表示のための樹木の生成手法, *NICOGRAPH 論文コンテスト*, pp. 22-29 (1988).
- [奥村 86] 奥村, 小川: 光天球の中で生長する樹形, *Sci. Form*, Vol. 2, No. 1, pp. 59-88 (1986).
- [Oppenheimer86] Oppenheimer, P. E.: Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees, *Comput. Graph.*, Vol. 20, No. 4, pp. 55-64 (1986).
- [Prusinkiewicz88] Prusinkiewicz, P., Lindenmayer, A. and Hanan, J.: Developmental Models of Herbaceous Plants

for Computer Imagery Purposes, *Comput. Graph.*, Vol. 22, No. 4, pp. 141–150 (1988).

[Smith84] Smith, A. R.: Plants, Fractals, and Formal Languages, *Comput. Graph.*, Vol. 18, No. 3, pp. 1–10 (1984).