

植物を対象とする CG 技術の研究動向

大野 義夫

慶應義塾大学 理工学部 電気工学科

〒223 横浜市港北区日吉3-14-1

ohno@on.cs.keio.ac.jp

概要

コンピュータを使って植物の画像を作る試みは、自然物体の表示技術追求の一環として、また、植物の成長過程を理解するため、さらには趣味として、多くの人が関心を持っている。ここでは、こうした植物と CG のかかわりあいについて、これまでなされてきたことを、その研究分野、描画の対象物、画像生成の目的、用いられた形状モデルといった観点から概観する。さらに、今後なされねばるべきことについても述べる。

Yoshio Ohno

Department of Electrical Engineering

Faculty of Science and Technology

Keio University

3-14-1 Hiyoshi, Kohoku-ku Yokohama-shi, 223 Japan

ohno@on.cs.keio.ac.jp

Abstract

Research of image generation algorithms of plants is drawing much interest of many people, because the plant is a typical natural object which can be seen almost everywhere. Such research may also lead to the understanding of the shapes of living things. In this paper, the works done in this field is surveyed from the following stand points: 1. research themes, 2. objects to be rendered, 3. purposes of rendering, and 4. geometric models used. Finally, problems to be solved are listed.

1 分野

コンピュータによって植物の形状を扱ったこれまでの研究は、次のような分野に分けることができる。

1. 植物の描画. 画像そのものを作ることが目的である場合で、その精密さ、対象物の大きさによって、さらに次のように分類できる。
 - 遠景. 林や一連の街路樹のような、集団としての樹木を描く。あるいは草原を描く。風景の中のいろいろとして植物を用いる場合である。
 - 中景. 1本の樹木あるいはひとかたまりの草を精密に描く。特定の樹種の特徴に着目し、その再現につとめる。
 - 近景. 花を描く。葉を描く。植物の中の特定の部分に着目し、図鑑のような図、写真のような画像の作成をめざす。
 2. 植物の成長モデル. 植物がなぜあのような形状をなすのかを解明するため、成長のメカニズムをモデル化し、コンピュータ内で再現することにより、モデルの妥当性を検証する。したがって、この場合には、若木から徐々に成長し、老木に至る変化、日照や他の樹木などの環境による影響 [29]、場合によっては、季節による変化なども再現することをめざすことになる [48]。
 3. 樹木の形状モデル. 上のカテゴリと似ているが、成長のメカニズムまでには言及せず、植物の形状をモデル化し、そのモデルに従つた形状を生成して、モデルの妥当性を検証する。
 4. 草木の動きのモデル. 風による植物の動きのモデルを作り、それを検証する。あるいは、その動きを利用したアニメーションを作る。筆者の知る限りでは、草の動きを研究した例はあるが [35]、もっと大きな樹木についてはまだ例がないようである。
5. その他. たとえば木目 [41] や樹皮などの、CGによる再現をめざす。とくに木目は家具などの材質感を得るために重要である。

2 対象物

植物を構成するすべての要素が対象となるが（ただし、現在までのところ、外から見えない根はほとんど対象として取り上げられていない）、とくに樹木、草を描く場合には、次のようなものの形状モデル、描画方法について検討する必要がある。

- 葉. 葉を表示しない例もかなり見られるが、表示する場合には、表現方法として、点 [35, 42]、三角形 [25]、関数近似 [39] などの他、実物の写真をスキャナで読みこみ、折り曲げた平面上にテクスチャ・マッピングした例 [4] などがある。さらに詳細な描画には葉脈が必要となる。これにはフラクタルを利用することが多いが、外形をスキャナで読んだ場合には、葉脈のパターンにもそのデータが利用できる。また、このパターンを3分木としてモデル化した例もある [42]。
- 花. 関数によって近似した例がある [39, 40] が、樹木と違ってパラメータ化はほとんどされておらず、花の種類ごとに各個擊破のアプローチとなっている。
- 枝. ワイヤフレーム表示の場合には、線分として表示したり、エルミート内挿曲線 [23]、スプラインなどの曲線 [4] として表示する。枝の枯死をモデル化した場合には、結果として、分枝点から次の分枝点までの間が折れ線で表わされることになる [17]。枝の太さも表示する場合には、円柱 [22]、円錐台、一般化した円柱、一般化した掃引 [4] などが利用される。とくに精密な描画の場合には、分岐の部分をどうあらわすかが問題と

なる。そこに斜めに切った円錐を挿入したり、特別の曲面パッチ [4] を利用した例がある。

- 果実、種子 [30, 44].
- 幹、枝と同様に、線分、円柱、円錐台を用いる場合が多いが、2次元のポテンシャル場によって定めた曲線(2次元のメタボール曲線)を高さにそって変化させたモデルもある [4]。さらに精密に描く場合には、幹の樹皮などのモデル化、描画も必要になる。これまでの例としては、単純な縞模様で代用したり [27]、実際の樹皮から石膏の型をとり、そのX線写真で得られた濃淡を厚みの変化として利用し、バンプマッピングを行なった研究がある [4]。

3 画像生成の目的

コンピュータ・グラフィックス一般に言えることであるが、ある物体の画像を作ろうとするとき、どのようなモデルをその物体に採用するかを決定する要素として、物体の形状そのものだけでなく、その画像をどのような目的に使うかも考慮しなければならない。画像の使用目的によって、表示の精密さ、許されるコストが左右されるからである。

植物の場合には、次のような目的のために画像生成が行なわれてきた。

- 表示技術の追求。コンピュータによってどこまで本物に近い絵が作れるかということ自体が研究目的である場合。
- 植物の成長過程の理解。われわれが目にする植物、とくに樹木はなぜあのような形になったのかを理解する。そのため、葉が受ける光の量、枝にかかる重量などを考慮して、植物が成長するモデルを作成し、そのモデルに従って成長した樹木のモデルを絵として表示させ、実際の植物の形状と合致

するかどうかを見ることにより、成長モデルの妥当性を検証する [29]。

- 植物を含む映像の作成。映画などで、実写では思うような形状、配置などが得にくい場合に、コンピュータ映像で代用することが考えられる。また、植物のモデル中のパラメータを操作すれば、現代の地球上には存在しないような植物の映像を作ることもできる。
- 景観シミュレーション [27, 47]。建築物の設計、市街の設計などの完成予想図をよりリアルに見せるために、街路樹、庭木などを配置する。場合によっては、ライト・シミュレータやドライブ・シミュレータの映像中に植物が必要となる場合もある。
- 趣味、芸術 [28, 39, 48]。美しいものを描きたい、など。必ずしもリアルであることをめざすとは限らない。

4 形状モデル

樹木の分枝や、草の茎の形状を表わすモデルとしては、次のようなものが使われている。

- フラクタル [8, 15, 22, 24, 30, 31]。樹木の分枝や葉脈のパターン、羊葉類やつるまき植物の形状に自己相似性が見られることから、フラクタル图形によってこうした植物の形状をモデル化することは、多くの人によって行なわれた。フラクタル图形の生成規則によって得られる形状は一意に決定され、ランダム性は存在しない。
- 形式文法の生成規則 [32, 33, 34, 38]。生成規則によって分枝のパターンを定義できることが何人かによって着目されてきた。ただし、適用できる生成規則はすべて同時に適用する。たとえば、初期状態を g 、生成規則を $\{g \rightarrow d(g)(g), d \rightarrow d, (\rightarrow (,) \rightarrow)\}$

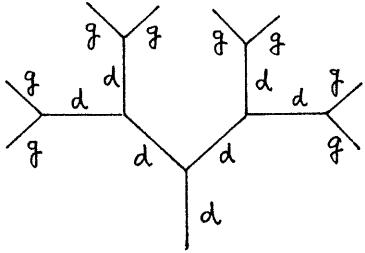


図 1. Graftal の例 ([1] より).

としたときには、次のような文字列が順次生成される。

1. g
2. $d(g)(g)$
3. $d(d(g)(g))(d(g)(g))$
4. $d(d(d(g)(g))(d(g)(g)))$
 $(d(d(g)(g))(d(g)(g)))$

これらは、たとえば 4. の文字列を図 1 に示すような分岐パターンと解釈することができる。これもフラクタル同様、文法が決まれば得られる形状が一意に決定され、ランダム性はない。

これにさらに attractor, inhibitor と呼ばれる点を追加することにより、枝の方向を一定の規則に従って曲げ、実物に近い枝ぶりを得た研究もある [1].

- 実際の樹木の観察によって、枝の長さ、角度などに関する統計的なデータを入手し、これにもとづいて樹形を生成する [1, 36]. ([42] はこれを分岐行列 (ramification matrix) という形式で表現した.) 現在のところまだ、さまざまな樹木を描くための統計データが十分に整備されているとはいえないようである。このアプローチではフラクタルや形式文法にもとづく方法とは異なり、ほとんどの場合にランダム性が加味される。
- さらに、自分自身 [11, 12, 14], あるいは環境とのインタラクションを加味する。たと

えば、枝の重さを考慮したり、自分自身あるいは他の樹木などによる影を考慮して、他の枝や葉に接近しないようにしたり、なるべく多くの日照を受けられるように成長させるなど [13, 29]. 例えば [29] では、木の成長シミュレーションのパラメータとして、次の 11 個を採用した。

分枝システム関連: 角度、劣性度、偏向性、重力対応システム関連: 反重力性、枝だれ率。幹性関連: 初期幹性、幹性分散率、幹性消失速度。蔓性関連: リサーチ角度。代謝関連: 葉球半径、枯死限界光量。

また、一度得られた枝をあとから適当に除去するとよい結果が得られるとの報告 [6, 19, 20]、さらに、受光量を考慮することによって枝のたれさがりが再現できたとの報告 [21] もある。

- 多くの成長モデルは枝を単位としているが、薦のような植物ではむしろ、3 次元空間をボクセルに分割し、その中で環境などのインタラクションを考慮する方がよい [10]. この方法は一種のオートマトンとも考えることができる。このアプローチは、根の生育のシミュレーションにも適用可能であろう。

フラクタルや形式文法に従う方法は、シンプルなアルゴリズムによって形状モデルを生成することができるが、同じ樹種に対して微妙に形状の異なる多くのモデルを得ることは困難であり、また、偶然にたよらずに、特定の樹木に似た形状のモデルを生成するためにはどのような規則を用いればよいのかがわかりにくい。逆に、樹木の形状をわかりやすいパラメータによって規定し、それに従った樹形を作ろうとするところもある [16]. この場合には、次のようなパラメータを与えた。

樹木の外形 (輪郭は大体どんな形をしているか), 幹の太さ, 木の高さ, 力枝の高さ, 枝

の込み具合, 枝の分岐角度, 枝の伸び方(まっすぐか, くねくねしているか)

一方, 既存の画像にもとづいて, それを生成するような規則(IFS—Iterated Function System)を自動的に生成するアプローチも研究されている[2, 3]。

きわめて遠くから見た樹木の場合には, モデルを樹冠の概形のみの近似, たとえば橈円体のようなものですませ, ランダム性を加味した透明度の変化をテクスチャ・マッピングとして与えることにより, 変化を与えた研究もある[9]。

5 今後の課題

これまでのところ, 樹木の描画に関しては, 成長のメカニズムを次々に形状モデルに取り込むことによって, 画質が着実に向上してきた。とくに植物は環境の影響によって形状が変化するところが興味深い。さらにリアルさを追及するとなれば, より精密な統計データ(パラメータの種類の検討)。その値—平均値だけでなく, 分散も)を得る努力とともに, 実際の樹木に見られる多くのキズ, たとえば折れた枝, 裂けたり倒れたりした幹, 枯れたり虫に食われた葉, 一部露出した根, 寄生植物のからまりといったものを画像の中に反映させることも必要になってくるだろう。ただし, そうしたことまでやる価値があるかどうかは, そこまでしてリアルな植物のCG画像を作る必要性があるかどうかということにかかわってくる。

これも必要性が問題であるが, 従来あまりCGの対象とされていなかった植物としては, ヤシなどの熱帯植物, サボテン, キノコ, 水草, 海草などがある。海草の場合には, 水の流れに伴なう動き, 半透明感など光線の処理が必要となる。その他, 植物の一部分としては, 野菜, 果実, 種子, 根, 葉などの描画は十分に研究されているとは言えない。

また, ほとんど手のつけられていない分野と

して, 風による樹木の動きや, 草の発芽から開花, 結実といった成長過程などがある。

応用分野としては, 庭園の設計, 庭木の剪定の事前評価なども考えられそうである。将来は, 都会から失われた自然をCG庭園によって取り戻したり, 絶滅した動植物のCGデータや形状モデルによる保存といったことも行なわれるかもしれない(どうせ保存するなら, 遺伝子を保存した方がもっと直接的かもしれない[7])。また, コンピュータ・アートに属するかもしれないが, リアルさよりも美しさをめざすアプローチをめざす研究や趣味も続けられるであろう。

参考文献

- [1] M. Aono, T. L. Kunii, "Botanical Tree Image Generation," *IEEE Computer Graphics & Applications*, 4(5), May 1984, 10-34.
- [2] M. F. Barnsley, A. Jacquin, F. Malassenet, L. Reuter, A. D. Sloan, "Harnessing Chaos for Image Synthesis," *SIGGRAPH '88*, 131-140.
- [3] M. Barnsley, *Fractals Everywhere*, Academic Press, 1988.
- [4] J. Bloomenthal, "Modeling the Mighty Maple," *SIGGRAPH '85*, 305-311.
- [5] 千葉則茂, "樹木・草本の生成に関する研究動向," 情処グラフィックスとCAD, 89-CAD-40, 1989年8月, 81-86.
- [6] 千葉則茂, "樹木と岩," *PIXEL*, 1990年6月, 115-120.
- [7] M. Crichton, "Jurassic Park," 1991. 邦訳: 早川書房, 1991.
- [8] S. Demko, L. Hodges, B. Naylor, "Construction of Fractal Objects with Iterated Function Systems," *SIGGRAPH '85*, 271-278.
- [9] G. Y. Gardner, "Simulation of Natural Scenes Using Textured Quadric Surfaces," *SIGGRAPH '84*, 11-20.
- [10] N. Greene, "Voxel Space Automata: Modeling with Stochastic Growth Processes in Voxel Space," *SIGGRAPH '89*, 175-184. 邦訳: 日経CG, 1990年1月, 184-194.
- [11] 本多久夫, "樹木の幾何学的模型," 数理科学, 184, 1978年10月, 18-25.
- [12] 本多久夫, "樹木の分枝," 数理科学, 221, 1981年11月, 51-57.

- [13] 本多久夫, “樹形の三次元モデル,” *Science on Form*, 1(1), 1985, 85–94.
- [14] 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, 1974年6月, 34–38.
- [15] 出原栄一, 樹木, 築地書館, 1983.
- [16] 井上秀紀, 江島俊郎, 小谷一孔, 宮原誠, “様々な自然物に適用できる樹木の形状定義法,” 情処グラフィックスと CAD シンポジウム, 1990年11月, 157–166.
- [17] 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,” 情処グラフィックスと CAD, 86-CAD-21, 1986年5月.
- [18] 柿本正憲, 林伸彦, 大口孝之, 山藤真二, N. マックス, “一般化シリンドラを用いた枝分れ物体のモデリングとマッピングの手法,” 情処グラフィックスと CAD, 89-CG-39, 1989年7月.
- [19] 金丸直義, 千葉則茂, 斎藤伸自, “CG のための樹木の手続き的形状定義法について,” *PIXEL*, 1988年2月, 54–55, 40.
- [20] 金丸直義, 千葉則茂, 斎藤伸自, “CG のための樹木の成長モデル,” 第4回 NICOGRAH, 30–38, 1988.
- [21] 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シミュレーション,” 情処グラフィックスと CAD シンポジウム, 1990年11月, 167–175.
- [22] Y. Kawaguchi, “A Morphological Study of the Form of Nature,” *SIGGRAPH '82*, 223–232.
- [23] Midori Kitagawa De Leon, “三次元エルミート補間を用いた樹状形態の生成とアニメーションのシステム,” 第6回 NICOGRAH, 161–170, 1990.
- [24] B. B. Mandelbrot, *Fractals: Form, Chance and Dimension*, W. H. Freeman, 1977. 邦訳: 広中平祐, フラクタル幾何学, 日経サイエンス社, 1985. 第2版: *The Fractal Geometry of Nature*, 1982.
- [25] R. Marshall, R. Wilson, W. Carlson, “Procedure Models for Generating Three-Dimensional Terrain,” *SIGGRAPH 80*, 154–162.
- [26] 三原正一, “木生成プログラム紹介,” *PIXEL*, 1989年8月, 51–52.
- [27] 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方法,” 第4回 NICOGRAH, 22–29, 1988.
- [28] 小川康男, “乱数を使って樹木を描く,” 日経 CG, 1989年6月, 158–159.
- [29] 奥村昭雄, 小川真樹, “光天球の中で生長する樹形(樹形の構成要素と環境への対応),” *Science on Form*, I: 2(1), 1986, 59–88. II: 3, 1988, 127–141.
- [30] P. E. Oppenheimer, “Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees,” *SIGGRAPH '86*, 55–64.
- [31] クリフォード A. ピックオーバ, “植物の形状と成長をシミュレーション,” 日経 CG, 1987年10月, 107–109.
- [32] Przemyslaw Prusinkiewicz, James Hanan, *Lindenmayer Systems, Fractals and Plants*, Lecture Notes in Biomathematics 79, Springer Verlag, 1980.
- [33] P. Prusinkiewicz, A. Lindenmayer, J. Hanan, “Developmental Models of Herbaceous Plants for Computer Imagery Purposes,” *SIGGRAPH '88*, 141–150. 邦訳: 日経 CG, 1989年1月, 146–160.
- [34] Przemyslaw Prusinkiewicz, Aristid Lindenmayer, *The Algorithmic Beauty of Plants*, Springer Verlag, 1990.
- [35] W. T. Reeves, R. Blau, “Approximate Probabilistic Algorithms for Shading and Rendering Structured Particle Systems,” *SIGGRAPH '85*, 313–322.
- [36] P. de Reffye, C. Edelin, J. Françon, M. Jaeger, C. Puech, “Plant Models Faithful to Botanical Structure and Development,” *SIGGRAPH '88*, 151–158.
- [37] T. T. Sasada, “Drawing Natural Scenery by Computer Graphics,” *CAD*, 19(4), 1987, 212–218.
- [38] A. R. Smith, “Plants, Fractals, and Formal Languages,” *SIGGRAPH '84*, 1–10.
- [39] 戸川隼人, 花のCG, サイエンス社, 1988.
- [40] 戸川隼人, “ランを描く,” *PIXEL*, 1989年1月, 73–78, 42.
- [41] 鶴岡信治, 新帶利博, 木村文隆, 横井茂樹, 三宅康二, “ボテンシャル法を用いた木目の表示方法について,” 第1回 NICOGRAH, 83–88, 1985.
- [42] X. G. Viennot, G. Eyrolles, N. Janey, D. Arquès, “Combinatorial Analysis of Ramified Patterns and Computer Imagery of Trees,” *SIGGRAPH '89*, 31–40.
- [43] ジェニファー・D・ワイト, “樹木の成長をシミュレートする,” 日経 CG, 1987年10月, 109–110.
- [44] 四本柳, “ヒマワリの種子の配列,” 第1回 NICOGRAH, 149–158, 1985.
- [45] “Cubicomp Corp. 製 PICTURE MAKER による作品群,” *PIXEL*, 1986年5月, 53.
- [46] “自然物のCG表現, 利用の時代を待つ,” 日経 CG, 1988年12月, 8–19.
- [47] “建築と土木の景観シミュレーション, リゾート開発で統合利用へ,” 日経 CG, 1990年1月, 121–126.
- [48] “花の万博CG映像, 生物の表現と対話機能を工夫,” 日経 CG, 1990年4月, 135–140.