

## 樹木のCGのための肥大生長シミュレーション

大志田憲 村岡一信 千葉則茂

岩手大学 工学部

樹木のモデリングやレンダリング法に関する研究はとりわけ活発に研究が行われてきた分野のひとつである。樹木のモデリングにおいては、より樹木らしさを表現するためには樹形の肥大生長による経年変化の表現も重要である。これまで、樹木の生長モデルがいくつか提案されてきているが、太さに関するべき乗則に従ったものがあるだけで、ストレスによる複雑な肥大生長をシミュレーションできるものはない。本報告では、質点-バネモデルにより、樹木の各部位でのストレスを求めるこことにづく、肥大生長モデルを提案する。

### Thickening Growth Simulation of Tree for CG

Ken Ohshida, Kazunobu Muraoka, and Norishige Chiba

Faculty of Engineering, Iwate University

The modeling and rendering method of a tree is one of the active CG research fields. In the modelling of tree shapes, the representation of the secular change of tree form by the thickening growth is also important to give natural impressions. Although some growth models of trees based on the power law on the thickness have been proposed, no one has ability to simulate the complicated thickening growth due to the internal stress field of a tree. In this paper, we propose a thickening growth model that employs the mass-spring model to compute the stress field.

### 1. はじめに

近年、コンピュータグラフィックス(CG)は、建設計画等の景観シミュレーション、映画、アニメーション、マルチメディアコンテンツ、サイエンティフィック・ビジュアリゼーションおよびバーチャルリアリティ等、さまざまな分野で用いられており、そのためCG技術に関する研究開発も盛んに行われてきている。このような研究開発の分野のひとつとして、植物の生長、地形の形成、および炎や水流の振る舞いなどの自然現象のビジュアルシミュレーションのためのCG技術の研究開発があり、これまでもさまざまな研究報告が行われてきている。なかでも、樹木のモデリングやレンダリング法に関する研究はとりわけ活発に研究が行われてきた分野のひとつである<sup>1)~9)</sup>。それは、樹木の複雑な形状のCGによる表現それ自体が魅力的であることや、造園設計CADや土木建設用景観シミュレーションなどの分野に幅広い応用を持つためである。

これまで、樹木の生長に関して、受光量等の生育環境や生長の制御機能を考慮した樹木の生長モデルなど、いくつかの生長モデルが開発されてきている、しかしながらより樹木らしさを表現するためには樹形の肥大生長による経年変化の表現手法も重要である。肥大生長は、老木や盆栽などの樹木の近景映像において、樹齢に関する視覚的印象に大きな影響を与えていた。これは、肥大生長では、幹や枝が一様に太るわけではなく、部位にかかるストレスによって太り方が経年変化し、それが樹齢の印象を与える要因となっているためである。しかしながら、これまで経年変化する肥大生長のCGシミュレーション法は提案されていない。本論文では、樹木のストレスを考慮した樹木の肥大生長モデルを提案する。これは、樹木の形状をポクセル空間で表現し、それぞれのポクセルを質点とする質点-バネモデルを適用し、各部位にかかるストレスを求めるこによって肥大生長を実現するものである。本手法を用いることによ

より、より高品質な樹木のモデリングが可能となる。

以降、第2章ではこれまでの樹木の枝の太さに関する報告をまとめ、肥大生長のモデル化に必要となる機能を述べる。第3章では、2章で述べたモデル化に必要となる機能を考慮した樹木の肥大生長モデルを提案する。第4章で実際にシミュレーションを行いその有効性を示す。第5章でまとめ、今後の課題を示す。

## 2. 肥大生長機能

樹木は、それぞれの枝の重さや外力に対して耐えようとする様に肥大しながら生長していく。これまで、樹木の枝の太さに関する報告はいくつがある。樹木の枝は先端へ向うほど細くなるような形となるものであるが、高安<sup>6)</sup>では自然の形状の中で樹木の分枝と似たような枝分かれの構造をもつ血管についての、直径の分布を調べた例が紹介されている。直径  $d$  の血管が直径  $d_1$  と  $d_2$  の血管に分枝したとした場合、

$$d^a = d_1^a + d_2^a ,$$

を満たす数として  $a$  を定義している。樹木にあてはめた場合に、樹木の枝に対し荷重を支える事を主用機能とみなして、荷重を支えられる限り枝の素材を出来る限り節約するという最大応力一定のモデルの基に  $a=2.5$  を導いている。また、山越ら<sup>8)</sup>により枝の形態と力学的適応性として曲げモーメントを用いて、様々な樹種の枝の太さの調査報告もある。しかしこれらは枝を均等な円柱の大きさを持った節間のつながりとした場合にあてはまるものといえる。山越らによって枝分岐部の肥大生長に関して、有限要素法を用いて表層応力を調査したとう報告もある。それによると、枝分岐部等ではその枝分岐部の応力（歪み）、特に形成層の存在する表層部における応力が強く関与していると報告されている。しかしながら、実際に樹木のCGへの肥大生長シミュレーションにまで応用したものはない。

樹木等の植物細胞は動物細胞と異なった生長機構を持っており、植物細胞の細胞生長は細胞壁

の可塑的伸長・変形（植物細胞の膨脹変化による）を通じて発現する。このように細胞生長の過程をみると、細胞壁に膨脹検出器あるいは応力（歪み）検出器のようなものが存在することが予想されている。またある一定の大きさ以上の外部応力刺激により細胞壁に可塑的歪みを与えるとそれが引き金となり細胞分裂あるいは拡大（膨脹増加による細胞伸張増大）を誘起し細胞生長が発現すると考えられている。

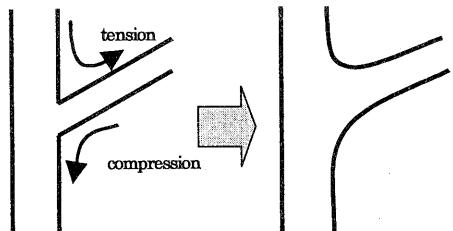


図1 肥大生長

Mattheck<sup>9)</sup>によると樹木は自重のみならず外部からの影響（外力）によりその肥大の仕方は大きく異なることが報告されている。図2は外力による肥大生長変化の例である。この図のように常に強い風が吹いているような場所の樹木は均等に肥大するわけではなく、樹木自身にかかる外力によって太り方が異なることが報告されている。

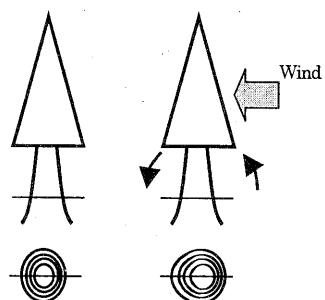


図2 外力による肥大影響

また尾田<sup>9)</sup>によると、斜面に樹木を植えた場合にも重力の影響により均一に肥大するのではなく、圧力や張力によって肥大の仕方が異なることが述べられている（図3参照）。尾田によると、樹木は針葉樹と紅葉樹では肥大の仕方が異なり、図3で図示されているとおり針葉樹は力が加わ

る部分に圧縮あて材を施したように肥大生長し、広葉樹は引張あて材を施した様に生長するということが報告されている。

これらのことから肥大生長シミュレーションを行うためには以下の性質を持ったモデルが必要と考える。

- ・樹木の各部分での圧縮や張力が検知できる。
- ・圧縮部肥大と引張部肥大が実現できる。

上記の性質を実現する肥大生長モデルを提案する。

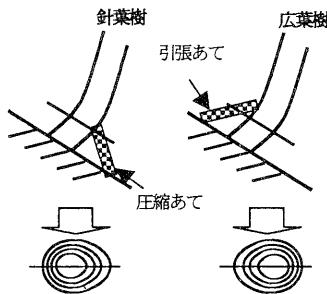


図3 斜面での肥大生長

### 3. 肥大生長モデル

肥大生長のシミュレーションは本来、発芽時点から繰り返し行わなければいけないが、計算時間の観点から、ある時期まで生長した樹木の骨格モデルに前述のべき乗則に従った太さを与えることによって、近似的な肥大生長を実現している。この樹木データは、各節間にはそれぞれ長さおよび太さが格納されている。この初期太さは先に述べた前章で述べた高安らによる式から導き出したべき乗則に従う樹木の枝（節間）の初期太さである。

ここで提案する肥大生長モデルは樹木をボクセル空間に登録し、そのボクセル空間で樹木の存在する部分を質点とした質点一バネモデルを用いることによって各点の圧力、張力を検知して部分的な肥大を行うものである。

ここで提案する肥大生長シミュレーションの概要は以下のようである。

- Step1: 樹木の生長モデルにより骨格データを得る。

Step2: 骨格データから初期樹皮面を表す3角形ポリゴンモデルを生成する。

Step3: ボクセル空間に3角形ポリゴンモデル（内部の詰まったものとして）を登録する。

Step4: 3角形パッチを登録したボクセル空間から、質点およびバネモデルを生成する。

Step5: 質点一バネモデルを用いて各質点での圧縮、引張を調べる。

Step6: 圧縮、引張をもとにボクセル空間に登録してある樹木データを肥大させる。

Step7: ボクセル空間から樹木の表面の3角形ポリゴンを生成する。

以下に各Stepを説明する。

#### Step1: 樹木の生長モデルにより骨格データを得る

これまでの既開発の樹木の生長シミュレーションから出力された樹木の骨格データ（幹や枝等の肥大が大きく影響する部分）を得る。これは各座標と基本となる初期枝太さが格納されたものである。

#### Step2: 骨格データから初期3角形ポリゴンモデルの生成

骨格データからその樹皮面の3角形ポリゴンモデルの生成を行う。これは骨格データの軸を基に各節間を表す8角柱を生成するものである。これは次のStepで述べるボクセル登録を行うために生成するものである。

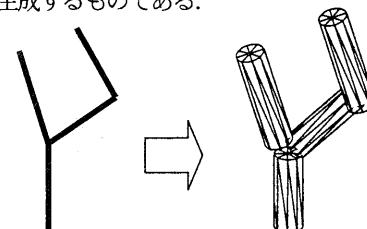


図4 初期樹皮面ポリゴンの作成

#### Step3: 3角形ポリゴンモデルのボクセル空間登録

ボクセル空間への3角形ポリゴンによる形状の登録方法は以下の手順を用いて行う。

- ・ボクセル空間内に3角形ポリゴンモデルを配置する。
- ・Z軸方向から各ボクセルに平行に複数本の（今回は5本）レイを放射しボクセル空間にパッチが存在するかどうか（樹木の枝の内部か外部か）を判定し濃度分布を作成する。

樹木のボクセルへ存在量を濃度として登録し、ボクセル空間を樹木の枝の0.0~1.0を範囲とした濃度分布とする（図5参照）。

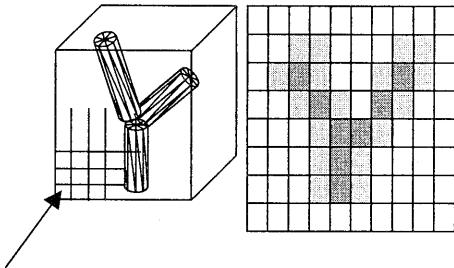


図5 ボクセル空間の濃度分布作成

**Step4：ボクセル空間から質点一バネモデルを生成**  
ボクセル空間に登録された樹木の分布を基に、樹木が存在するボクセルを質点とし、その各質点と隣り合った質点同士を結んで質点一バネモデルを生成する。図6は質点一バネモデルの2次元での例である。各質点と隣り合う質点（2次元では8連結の点）すべてとバネで結ぶものとする。

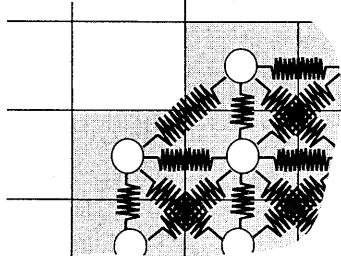


図6 質点一バネモデル

**Step5：質点一バネモデルによる圧縮、引張計算**  
樹木をバネモデルで表現することにより、各質点に関する運動方程式により変形のシミュレーションを行うことによって、各質点での圧縮、引

張を調べることが可能となる。また、樹木に風や任意の圧力が加わった外力がかかる場合のシミュレーションも可能となる。

外力を用いない重力と隣接質点との連結に使われているバネのみの力によるシミュレーションを考えた場合は以下の式となる。

各質点の運動方程式は以下の様である。

$$f(t) = ma(t) = mg + \sum S_n(l) - Cv(t),$$

ここで

$m$  : 質量

$a(t)$  : 加速度

$f(t)$  : 時刻  $t$  で質点に働く力

$g$  : 重力加速度

$S_n(l)$  : 質点に隣接するバネ  $n$  が  $l$  の長さの時の質点に加わる力

$v(t)$  : 時刻  $t$  での質点の速度

$C$  : 減衰定数

$h(t)$  : 時刻  $t$  での質点の位置

$v(t) = dh(t)/dt$

である。この微分方程式に対して、改良オイラー法による差分方程式、

$$v(t + \Delta t) = v(t) + \Delta t \cdot \frac{f(t)}{m},$$

$$h(t + \Delta t) = h(t) + \frac{\Delta t}{2} (v(t) + v(t + \Delta t)),$$

を得る。ここで  $m=1$  とすると上式は

$$v(t + \Delta t) = v(t) +$$

$$\Delta t (g + \sum S_n(l) - Cv(t)),$$

となる。

また各バネに働く力は、

$$S = k(l - l_0),$$

$k$  : バネ定数

$l$  : バネの長さ

$l_0$  : バネの初期状態の長さ

ただし、バネの伸び縮みの長さの限界値を与えている。シミュレーションの結果、各質点での圧力、張力はそれぞれ各質点に連結しているバネの力の和をとることにより以下のように定める。

質点での圧縮力=質点に連結している圧縮され

ているバネに働く力の総和

$$f_{compression} = \sum S(j)$$

(ただし、圧縮されているバネのみの力の和)

質点での引張力=質点に連結している引っ張られているバネに働く力の総和

$$f_{tension} = \sum S(j)$$

(ただし、引っ張られているバネのみの力の和)

#### Step6: ボクセル空間を利用した肥大生長

質点一バネモデルを用いた計算により、質点の存在する各ボクセルには圧縮力と引張力が格納されることから、それらの圧縮力、引張力をもとにボクセルに登録してある樹木を肥大させる。実際の樹木は樹皮の内側に存在する形成層にある細胞が分裂・肥大することにより肥大することから、樹木の外側（濃度分布でいう 1.0 以下）の部分で肥大を起こすものとする。肥大はそのボクセルに格納されている濃度値を増加させ隣接ボクセルへと濃度を伝搬させることによって実現する。

あるセルが肥大を起こす場合の肥大量  $Csi$  は

$$Csi = (\alpha \cdot C_{den} \cdot f_{compression})^\beta ,$$

$\alpha, \beta$  : 定数

$Cden$  : セルの濃度

$f_{compression}$  : セル（質点）での圧縮力

で定義する。ここで、 $\beta$  を変化させることにより、圧縮されている部分をより顕著に肥大させることが可能となる。また引張の場合は、

$$Csi = (\alpha \cdot C_{den} \cdot f_{tension})^\beta ,$$

として肥大生長を行わせるものとする。そしてボクセルの初期濃度に増加した肥大量を加え、濃度が 1.0 を超えた場合に隣接するボクセルへ距離に応じて濃度を分配するものとする。

上記で求めた肥大量を隣接セルで分配することで肥大を実現する。隣接セルとの距離に応じて増加肥大量を分配した際に濃度量が 1.0 となった隣接ボクセルはこれ以上肥大（濃度増加）できないものとする。

#### Step7: ボクセル空間から樹木の表面の 3 角形ポリゴンを生成する

ボクセル空間から樹木の樹皮表面パッチを生成を行うために、土井<sup>10)</sup>の手法を用いることに

する。これはボクセル空間に濃度登録されているものを、等濃度面を多面体に近似する手法である。空間に樹木の濃度分布が存在することからこの手法を用いることにより樹皮面の生成を行うことが可能となる。

#### 4. シミュレーション例

図 7 は Y 字型の樹木データの場合のシミュレーション例である。これは Y 字型の初期枝データ形状から、3 章で述べた肥大生長アルゴリズムを適用し実際にシミュレーションを行ったものである。初期枝データから生成した樹木表面のパッチの状態が(a)である。引張部分のみの肥大生長を行っていったものが(b) (c) である。(c) は一度肥大生長させた後にさらにそのボクセル空間を用い、さらに肥大させたものである。圧縮部分の肥大シミュレーションを行ったものが(d) (e) である。同様に(e) は一度肥大させたボクセル空間を用い、さらに肥大させたものである。シミュレーション結果から樹木の各部分（肥大、圧縮）に肥大生長が行われることが確認できる。

図 8 は樹木形状のデータを用いシミュレーションをおこなったものである。これは圧縮部分の肥大生長を行ったもので、圧縮部分の肥大が行われている事が確認できる。

#### 5.まとめと課題

本報告では、ボクセル空間を利用し、質点一バネモデルを構成することにより樹木の肥大生長のシミュレーションを可能とする手法を提案した。本アルゴリズムを用いることにより、これまで報告されていない樹木の部位におけるストレスを考慮した肥大生長のシミュレーションが可能となる。

今後の課題として、複雑な樹形でのシミュレーションによるモデルの改良や、樹木の生長モデルへの組み込み、質点一バネモデルによるシミュレーションの高速化などが挙げられる。

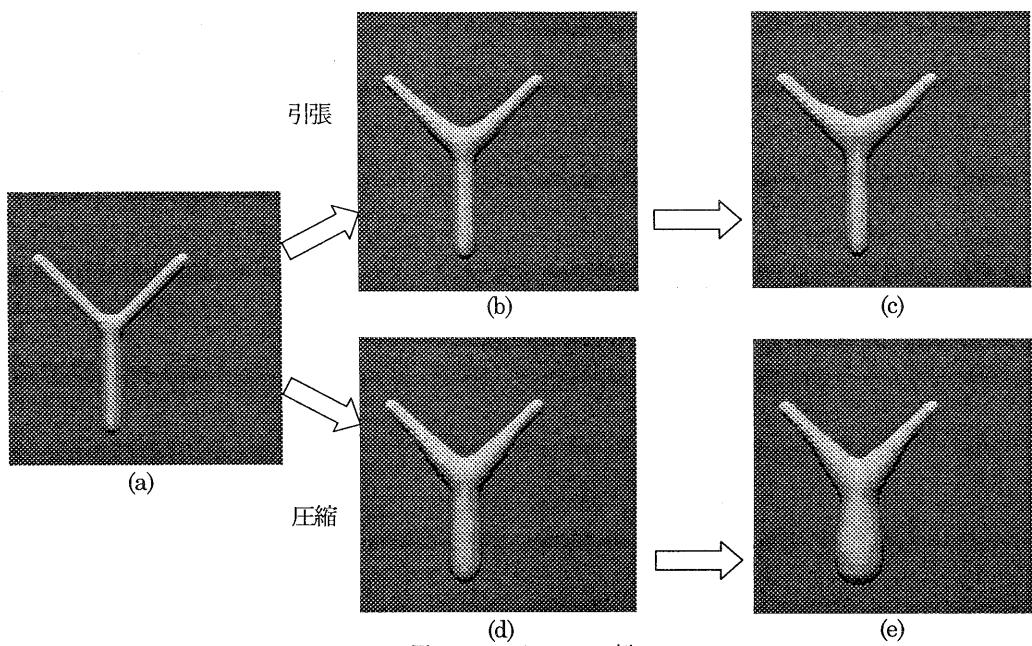


図7 シミュレーション例1

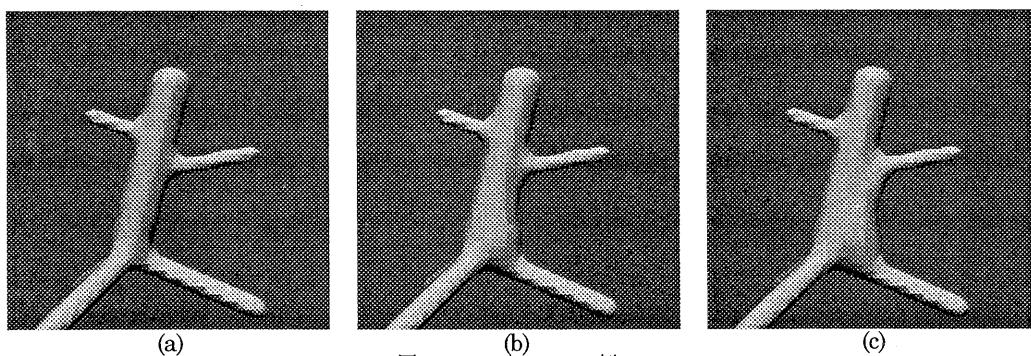


図8 シミュレーション例2

#### 参考文献

- 1) M.Aono and T.L.Kunii, Botanical Tree Image Generation, IEEE CG&A, Vol.4, No.5, 10-34(1984).
- 2) 安居院猛, 福田智美, 中島正之, 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)..
- 3) N.Chiba, K.Ohshida, K.Muraoka, Visual Simulation of Leaf Arrangement and Autumn Colors, The Journal of Visualization and Computer Animation, Vol.7, No2, 1996.
- 4) R.Mech,P.Prusinkiewicz, Visual Models of Plants Interacting with Their Environment, Computer Graphics, Proc SIGGRAPH96, pp.397-410(1996).
- 5) 大志田憲, 村岡一信, 千葉則茂, CGのための樹木の根と地上部の統合的生長モデル, 画像電子学会誌, 第28卷, 第4号, pp.367-277, 1999.
- 6) 高安秀樹, “フラクタル”, 朝倉書店, 1986.
- 7) 山越憲一, 牧秀之, 樹木の枝の形態と力学的応用, 1974
- 8) C.Mattheck, "Design in Nature Learning from Trees", Springer-Verlag, Berlin, 1998
- 9) 尾田十八, “形と強さひみつ”, オーム社出版局, 1997.
- 10) 土井章夫, 小出昭夫, 等閑数值曲面生成のための4面体格子法, 第三回 NICOGRAH 論文コンテスト論文集, pp.55-61, 1987.