

成長を考慮した樹皮のCGモデル

広田 光一[†] 加藤 弘和[†] 金子 豊久[†]

本研究では、樹皮の表面のひび割れパターンを、力学的モデルにより生成する手法を検討した。樹皮の近傍の領域を、樹木の表面の構造に関する植物学の知見に基づいて、層状のモデルとして表現した。さらに各層を、その微小領域を代表するノードと、微小領域間の結合を表現するバネとで構成される力学的なモデルにより記述した。ひび割れパターンは、樹木の成長にともない表層に生じる力に基づいて微小領域間の結合が破断した結果として発生する。さらに、樹木の比較的長期の成長における樹皮の生成、ひび割れ、剥離および脱落の過程を考慮するために、モデルにおける表層部分を多層化し、また新しい層を生成するメカニズムを付加することを試みた。また、このモデルを枝分かれなどを持つ形状に適用する手法を示した。このようなモデルに基づくシミュレーションを用いて、物理的特性を変化させることにより、目的とした樹皮パターンが生成されることを示した。また、樹皮をひび割れ、剥離および新層形成の繰返しにより、その成長過程のCG表現が可能であることを示した。

A Physically-based Simulation Model of Growing Tree Barks

KOICHI HIROTA,[†] HIROKAZU KATO[†] and TOYOHISA KANEKO[†]

In this paper, we describe a physically based simulation model of tree barks. Based upon careful observation of tree and bark growth we devised a multiple layer model for describing the growth of barks. The most external layer is the observable bark and the most internal layer is that of representing the origin of the bark growth. These layers are represented by using a spring-mass model. Also, to simulate the growth of trees in a long term, we introduced the concept of metabolism: a new layer is created at the most internal layer, and the most external layer is removed by peeling-off. In addition, we investigated on the method of building the layered spring-mass model on the surface of complicated shapes that have bumps and branches. We carried out a computer simulation and the resulting patterns resemble the actually observed bark patterns reasonably well.

1. はじめに

近年、現実感の高いCG表現が様々な領域で利用されるようになってきている。このなかで樹木の表現は、風景のシミュレーションに不可欠であることから比較的多くの研究がなされてきた^{1),10),11)}。また、木の成長過程を表現する試みもあるが、これらは主に木の形状やそれが環境から受ける影響に関するものであった^{6),15)}。本研究では、樹皮の表面に見られるひび割れパターンに着目し、これを生成する手法について検討する。樹皮の模様は、特に近景のCG表現において、現実感に寄与すると考えられる。

これまで、樹皮パターンを表現する手法として、テクスチャを生成しこれを木の形状の表面にマッピングする手法が提案されている。このようなテクスチャ

の生成には、写真などの実画像からデータを取得する方法²⁾のほかに、フラクタルなどを用いて幾何学的に生成する方法⁵⁾も提案されている。しかしながら、これらの手法は、一時点のみでの樹皮パターンを表現するものであるが、樹木の成長などを考慮したものではなかった。さらに、これらの手法においては、複雑な形状へのマッピング方法や樹皮表面の凹凸感の表現方法などが問題としてあげられる。

テクスチャを用いる手法の1つとして、村岡ら¹⁴⁾による‘断片貼り付け法’がある。この手法は、樹木の表面に樹皮の断片形状を無数に貼り付ける手法であり、貼り付ける断片の形状、数量を変化させることにより、複数の種類の樹皮と、樹皮表面の凹凸感を表現することが可能であることが示されている。しかしながら、経年変化の表現という観点からは、これは十分な手法ではなかった。

千葉ら¹³⁾は、樹皮のひび割れ現象を、樹皮を構成する材料内部の応力変化により表面部で生じる破壊現象

[†] 豊橋技術科学大学情報工学系
Department of Information and Computer Sciences,
Toyohashi University of Technology

の1つであると考え、これをバネモデルを用いてシミュレートする手法を提案している。これは、バネモデルによる破壊現象シミュレーションの手法を樹皮のモデリングに適用したものである^{4),8)}。千葉らによるモデルは、二次元に張られたバネにより記述された表層と、これに結合され成長にともなって拡大していく形成層の2層から構成される。形成層が成長していく過程で表層のバネが切断され、ひび割れが発生する。このモデルを用いることで、バネ定数の変化により多様なひび割れのパターンを発生させることができるとされるが、その設定方法は論じられておらず、シミュレーション結果も、実用的には十分なものとはいえないものであった。

本研究では、樹皮表面の成長過程を考慮したひび割れパターンを、力学的モデルにより生成する手法を提案する。具体的には、樹皮近傍の領域を、樹木の表面の構造に関する植物学の知見に基づいて、層状のモデルとして表現する。このなかでは各層を、微小領域を代表するノードと、それらの間の結合を表現するバネにより構成されるバネモデルで記述するものとする。また、ひび割れパターンは、樹木の成長にともない表層に生じる力に基づいて、微小領域間の結合が破断した結果として発生するものとする。さらに、樹木の比較的長期の成長における樹皮の生成、ひび割れ、剥離および脱落の過程を考慮するために、モデルにおける表層部分を多層化し、また新しい層を生成するメカニズムを付加することを試みる。さらに、この力学的モデルを、樹木のように枝分かかれやこぶを持つ複雑な形状に適用するための手法についても検討する。以下では、その詳細および結果について論じる。

2. 樹皮のモデル化

樹木のひび割れや剥離の現象は、樹木の成長により表面部の組織が変化することで生じる。樹木の肥大成長は維管束形成層とコルク形成層の2カ所において行われている⁹⁾ (図1)。維管束形成層の成長による変化は年輪の生成に影響することが知られているが、我々の注目している樹皮表面の組織の変化には影響しないと考える。すなわち、コルク皮層から内部の組織は肥大成長にともない、単純に増大すると仮定する。樹皮表面部では、コルク組織が表面部分からひび割れて、やがて剥離し、その内側のコルク組織ではひび割れが生じ、さらに内側では新たなコルク組織がコルク形成層から作られる。すなわち、成長のある一時点において、樹木の表面部は図2のような複数の層を持つモデルで表現できると考えられる¹⁶⁾。ここに、表層から

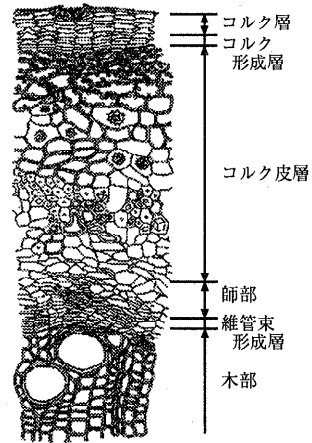


図1 幹の模式図

Fig. 1 Structure of tree bark.

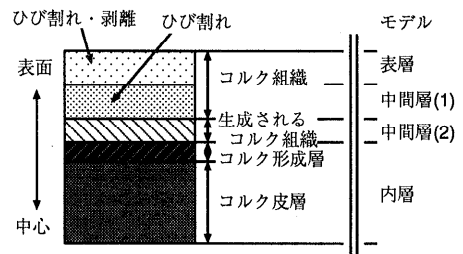


図2 樹皮表面部のモデル化

Fig. 2 Model of tree bark.

中間層(2)までが樹皮のコルク組織に、内層がコルク形成層およびコルク皮層以下の組織に対応する。以下では、このようなモデルにより多様な樹皮パターンの生成と、成長を考慮した樹皮パターンの変化のシミュレーションについて述べる。

3. 2層モデルによる樹皮パターンの生成

3.1 モデルと視覚表現

樹皮パターンは、樹皮の表面がひび割れることで形成される。ここではまず、ひび割れの発生だけに着目し、これをひび割れの生じる表層とその内部を構成する内層の2層からなる円柱型のモデルを考えた(図3)。各層をそれぞれ微小な体積領域に分割し、これらをノードにより表現する。また、層内および層間の微小領域間の結合を、それぞれバネおよび剪断バネで表現した。シミュレーションの方法は、基本的には文献12)に従った。この文献では、泥などのように表面の収縮に基づいてひび割れが発生する状況のシミュレーションが検討されていたが、樹木の場合には表面の収縮ではなく内層の半径および高さ方向の拡大に基づくものとしてモデル化する。このモデルの挙動は、

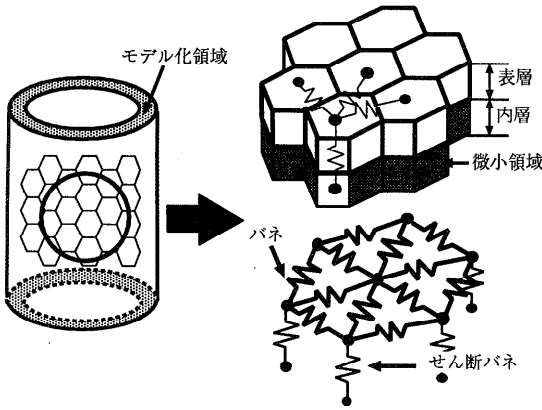


図3 2層型のモデル
Fig. 3 Two-layer mode.

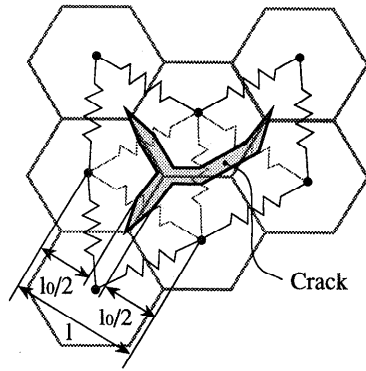


図4 ひび割れの視覚的表現
Fig. 4 Visualization of cracks.

表1 シミュレーションに用いられるパラメータ
Table 1 Simulation parameters.

樹皮の性質に関するパラメータ	
樹皮の密度	ρ [g/cm ³]
ヤング率	E [g · cm/s ²]
剪断弾性弾性係数	G [g · cm/s ²]
材料のばらつき	σ [-]
バネの限界平均伸び率	$\bar{\kappa}$ [-]
樹木の成長に関するパラメータ	
層の厚さ	D [cm]
初期ノード間隔	L_0 [cm]
初期高さ	$H_0 = L_0 N_H$
初期半径	$R_0 = \sqrt{3} L_0 N_R / 4\pi$
最大成長期間	T [s]
半径成長	δr [cm/s]
高さ成長	δh [cm/s]

表1に示されるパラメータにより決定される。ここに、 N_H および N_R は、高さおよび周方向のノードの数である。また、ひび割れは図4に示すような方法により視覚化される。この図の中で、 l はノードの間隔、 l_0 はバネの自然長である。すなわち、ひびはバネで表現される結合の中央部分に現れ、その幅は、ノード間距離が結合の本来の長さを越えて広がっている大きさに等しい。

3.2 樹皮パターンの生成結果

樹木の種類として、(1)クスノキ、(2)ナンキンハゼ、(3)松の3種類を選び、表2に示されるようにパラメータを設定し、シミュレーションを行った。ヤング率と剪断弾性係数は材料力学などの分野において用いられている木材に対する値を用いた³⁾。なお、2層からなるモデルでは、これに発生するひびの間隔の推定が可能であり、ここでは、パラメータを推定に基づいて決定している¹²⁾。この結果として得られたパターンを実物の写真と比較したのが図5である。また、こ

表2 特定の樹皮パターンに対するパラメータ
Table 2 Parameters for specific kind of tree.

	(1) クスノキ	(2) ナンキンハゼ	(3) 松
L_0 [cm]	0.33	0.33	0.33
E_1^{*1}	107.1×10^7	117.3×10^7	117.3×10^7
E_2^{*1}	117.3×10^7	117.3×10^7	117.3×10^7
G^{*1}	47.7×10^7	53.3×10^7	53.3×10^7
$\bar{\kappa}_1$ [-]	1.040	1.033	1.038
$\bar{\kappa}_2$ [-]	1.015	1.015	1.023

*1 単位は [g · cm/s²]

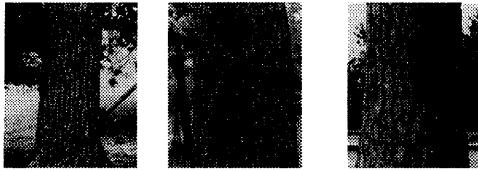
これらのパターンの縦横のひびの間隔を計測した結果を表3に示す。

以上の結果から、生成されたパターンは実物の樹皮に近いものとなり、目的とする樹皮を生成することができたと考えている。なお、生成結果におけるひびの間隔が実測と比較して小さくなる傾向があるが、これは推定のアルゴリズムがひびの間隔の最大値のみを推定するものであり、したがって、やむをえず、この推定値が実測の値に等しくなるパラメータをシミュレーションに適用したことによる。

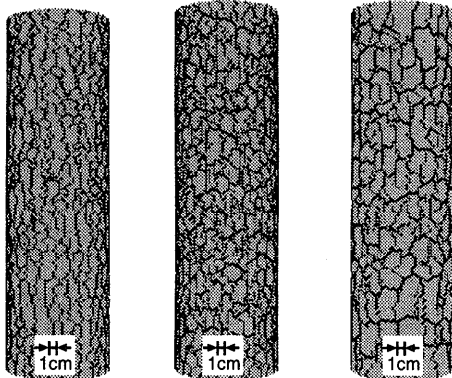
4. 樹皮の成長のシミュレーション

比較的長期間の樹皮の変化を考えると、樹皮の表層は剥離や脱落などにより徐々に失われ、一方で、コルク形成層においては、これを補うように新たなコルク質の組織が生成されて、これにより樹皮の新陳代謝が行われていると考えられる。また、この程度の期間に注目すると、木部の形成による幹の太さの変化が表面のひび割れパターンに影響を与えることが予想される。ここでは、樹皮表面のパターンの経年変化を表現するため、樹皮の剥離と新しい層の形成を考慮したモデルを構築し、シミュレーションを行う。

写真



生成結果



1.クスノキ 2.ナンキンハゼ 3.松

図5 樹皮パターンの生成結果
Fig. 5 Results of simulation.

表3 ひび割れ領域の形状

Table 3 Dimensions of the area surrounded by cracks.

種類	値	観察結果 [cm]	実験結果 [cm]
クスノキ	平均	$1.5 \times (>20)^{*1}$	1.58×11.6
	最大		$2.06 \times (>20)$
ナンキンハゼ	平均	$1.5 \times 3.0^{*2}$	1.70×3.02
	最大		2.08×3.96
松	平均	$3.0 \times 7.0^{*3}$	2.34×4.28
	最大		3.24×6.48

- *1 地面に垂直な方向（縦方向）に多くひび割れが生じている。
- *2 ひび割れに囲まれた領域（閉領域）を構成する。
- *3 樹皮の一部が剥離している。大きな樹木ほど、大きな閉領域を構成するようになる。この値は半径が5~10 [cm] ほどの樹木の場合。

4.1 樹皮各層の成長

樹皮の剥離が生じる場合、表層が剥離した領域では、その下の層が露出することから、表面のコルク層をモデルでは複数の層に分けて表現する必要がある。また、新しいコルク質の生成による成長を考慮するためには、コルク層の最下層の厚さが時間の経過とともに増加すると仮定するのが適当であると考えられる。これらの変化を考慮すると、モデルの構成としては4層以上を

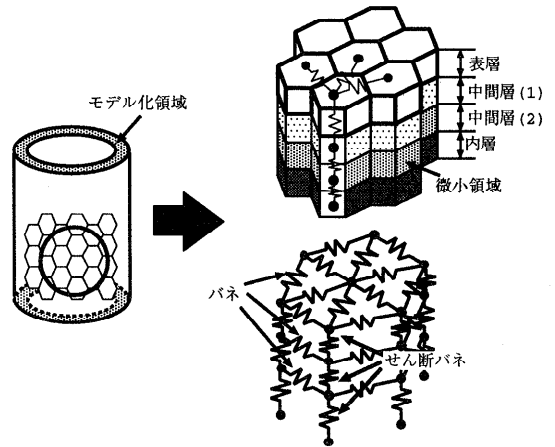


図6 4層型のモデル
Fig. 6 Four-layer model.

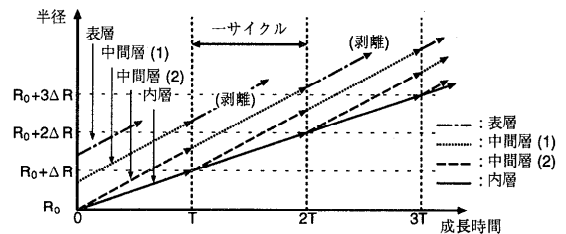


図7 時間の経過に応じたノード位置の変化
Fig. 7 Temporal change of layers.

持つことが望ましいと考えられる（図6）。すなわち、ひび割れおよび剥離を生じる表層、剥離にもなって露出する中間層(1)、成長にもなって厚さが変化する中間層(2)、そして、コルク皮層に相当する内層である。

一方、大きな樹木の年輪を観察すると、外周に近いところでは年輪の間隔はほぼ一定であることが分かる。すなわち、木自体の太さの変化をもたらす木部の成長は内層自体が半径方向に拡大することで表現できると考えられる。シミュレーションでは、中間層(2)が中間層(1)と等しい厚さに成長する期間(T)を1サイクルとして考えるものとした。このとき、各層の半径方向の位置は時間に関して図7のように変化することになる。ここに、 ΔR は期間(T)における内層の半径の成長幅である。また、1サイクルごとに、中間層(2)が中間層(1)に、中間層(1)が表層に役割を交代することで、各層は図中の矢印により示されているように、外側へと移動してゆく。

4.2 剥離のシミュレーション

剥離の現象は、幹の肥大により層間の剪断応力が高まることで生じると考えられる。本モデルでは表層と中間層(1)の間に限界剪断ひずみ(ϵ_{th})を設定し、モ

表4 剥離の計算に用いられるパラメータ
Table 4 Parameters of peeling off.

限界平均剪断ひずみ	$\bar{\kappa}_h$ [-]
乾燥範囲	η [cm]
乾燥係数	γ [-]
剥離領域割合	A [-]

デルの成長により発生する層間の剪断応力に基づいて剪断バネを切断することで剥離を表現する。さらに、剥離の現象は乾燥や外力により助長されると考えられるため、これらの現象も考慮するものとした(表4)。すなわち、ひび割れまたは剥離の生じている近傍では、乾燥により剥離が促進されると考え、その領域内に存在する層間の結合は他の部位に比べ弱いと仮定した。具体的には、剥離が促進される領域は、ひび割れまたは剥離を生じている部分から η [cm] 以内と仮定し、この範囲内に存在するノードの限界剪断ひずみが時間に関して指数的に減少するものとし、この収縮の時間的な変化を規定する値として γ を導入した。すなわち、時間 Δt の経過に対して、限界剪断ひずみが γ の割合で減少するものとした。また、樹皮の微小な断片は内部と結合している場合においても、外力により結合が破断し、剥離すると考えられる。ここでは、この影響を表層のひび割れに囲まれた領域の面積と、中間層(1)の結合領域の面積の比による剥離条件を設けることで表現した。具体的には、表層に生じたひび割れによって生成される閉領域と、中間層(1)との結合領域の比が、設定する剥離領域割合 (A) を超えたときに、この領域が剥離すると見なした。なお、剥離が発生した領域では表層の領域が排除され、下の層が露出するものとして視覚表現が行われる。

4.3 樹皮の成長結果

シミュレーションにより生成した樹皮の成長の結果を、図8に示す。ひび割れの発生していない状態から、各ノードを高さ方向と半径方向に成長させていくことで、時間経過とともにひび割れが発生することが確認された。また、ひび割れの発生により、剥離が進行していく様子も観察された。さらに、数サイクルにわたる変化から、樹皮の成長とともに、層の生成、剥離および脱落の過程が繰り返されることが確認された。

5. 枝別れ形状における樹皮パターンの生成

ひび割れおよび剥離に関するシミュレーションの検討では、円柱形のモデルを用いてきたが、現実の樹木は枝分かれやこぶなどを持つ複雑な形状をしている。また、はじめにも述べたように、力学的なシミュレーションの利点の1つは複雑な形状の表面に対しても、

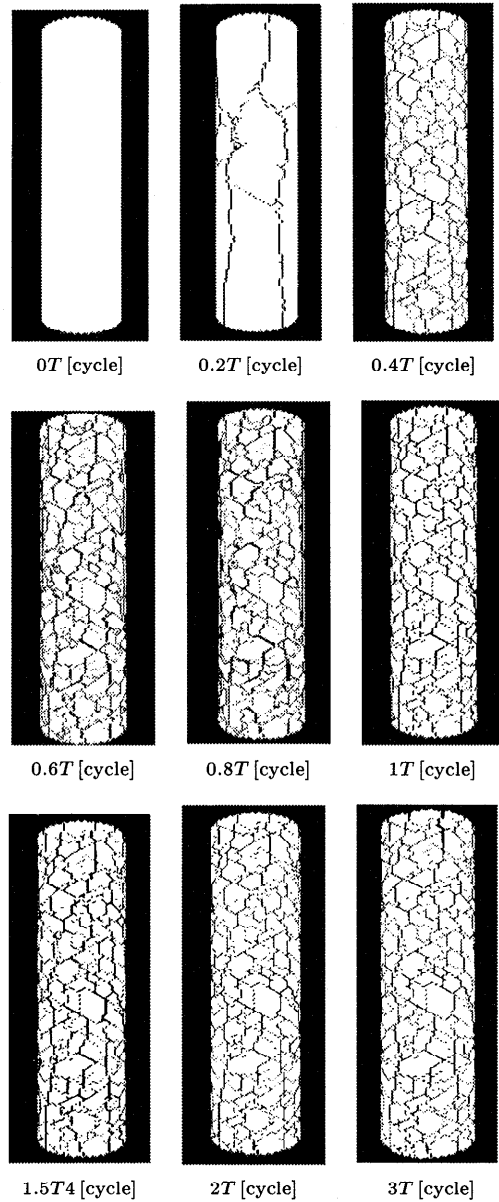


図8 樹皮の成長結果
Fig. 8 Results of simulation.

この形状に応じたパターンを発生できる可能性を持つことであった。以下では、上述のひび割れ生成のアルゴリズムを、枝分かれを持つ形状に適用する方法について論じる。

円柱形のモデルにおいては、数学的な関数でノードの配置を決定することができたが、任意の形状が与えられる場合は、このような方法がとれない。したがって、表面を記述するモデルの構築方法を検討する必要がある。また、円柱形のモデルでは、木の成長に関して半径と高さという2つの方向を明確に区別すること

が可能であったが、枝分かれ形状においてはこれが困難である。なぜならば、枝と幹とで半径方向および高さ（長さ）方向がそれぞれ異なっており、単純に高さあるいは半径方向に拡大する手法を用いることができないためである。したがって、半径方向と高さ（長さ）方向とで拡大率が異なる非等方な成長を実現する方法を検討する必要がある。

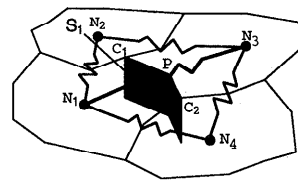
5.1 枝分かれを持つモデルの構築

枝分かれを持つ形状自体の作成については、将来的にはアルゴリズム的に生成することが考えられるが、本研究では実物として与えられている形状を入力し、これをもとにひび割れ生成のための表面モデルを作成するものとした。具体的にはこれは以下の手順による。まず、3次元形状入力装置（Digitizer 3030RGB, Cyberware）により形状を入力する。これにより、樹木の一部分の形状を三角形ポリゴンにより記述したデータが得られる。これにより生成されるメッシュは、ノード間距離にばらつきが多く、ひび割れのシミュレーションに適さない。したがって、次に、パブルメッシュ法⁷⁾をこの形状の表面に適用することで、ノード間距離のばらつきの少ないメッシュを生成する。

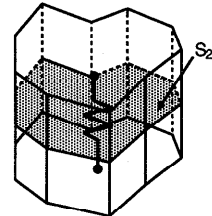
このようなモデルにおいてはノードの配置が円柱の場合と異なり均一ではなくなるため、パネ定数などのパラメータも各所で独立に設定する必要が生じる。具体的には、微小領域が相互に接する結合面積が各所で異なったものとなり、したがって、これをもとに計算されるパネおよび剪断パネの定数も各所で異なった値として設定される（文献12）参照。このような不均一なメッシュに対する結合面積を、図9に示す方法で定義した。すなわち、注目しているノード（たとえば N_1 ）に接続されているパネの中心（ P など）と、隣接するノード（たとえば N_2 および N_3 ）により構成される三角形の重心（ C_1 など）をつないで構成される閉曲線をノードの代表する領域（要素）の境界線と考える。このうち1つの隣接ノード（たとえば N_3 ）の境界線と共有されている部分（ C_1-P-C_2 ）の長さに要素の高さ H を乗じたものを、このパネが表現している結合の結合面積と考えるものとした。また、剪断パネの結合面積は、境界線により囲まれる領域の面積に等しいとした。なお、ここでは2層のモデルを構築しているが、同様の方法は4層のモデルの構築にも適用可能である。

5.2 非等方な成長の実現

樹木の半径方向の成長は、表面のメッシュの方向より計算される法線方向にノードを変位させることで近似的に表現することができる。これに対して、高さ



(a) パネ定数の結合面積



(b) 剪断パネ定数の結合面積

図9 結合面積の定義

Fig. 9 Area of connection.

（長さ）方向の成長を実現するためには、各ノードがどの枝に属しているどのような方向に成長するかということに関する情報を必要とするが、枝と幹の接合部分などにおいては、これを必ずしも明確に定義できるわけではない。

以下の実験では、全体の等方的な拡大と、法線方向への拡大を組み合わせることで、非等方な成長の実現を試みた。全体の等方的な拡大は、太さ（半径）方向に対する成長と高さ（長さ）方向の拡大とを同時に行う成長にほかならない。これに対して、法線方向の拡大は、近似的に太さ方向のみの成長を表現している。したがって、高さ（長さ）方向の成長を全体の等方的な拡大により行い、さらに、太さ方向の成長を法線方向の拡大により補うことで、非等方な成長が実現される（図10）。この方法の問題点として、幹あるいは枝ごとの長さ方向の成長を独立に制御できないこと、法線方向の成長は比率ではなく変位として与えざるをえないため、枝の太さによって成長率が異なったものとなることなどがあげられるが、ここでは、枝分かれ形状におけるひび割れパターン生成に重点をおいており、これらは今後の課題としたい。なお、樹木の枝の高さ（長さ）および太さ（半径）方向の成長の速度は、成長の時期によって変化すると考えられる。以下の実験では高さ（長さ）方向に比べて太さ（半径）方向への成長のほうが大きい場合についてシミュレーションを行っているが、このような関係がつねに成り立つわけではない。とくに枝の発生直後の時期は半径方向に比較して長さ方向の成長率が大きくなると考えられる。このような成長は、上述の成長の実現方法では、相似

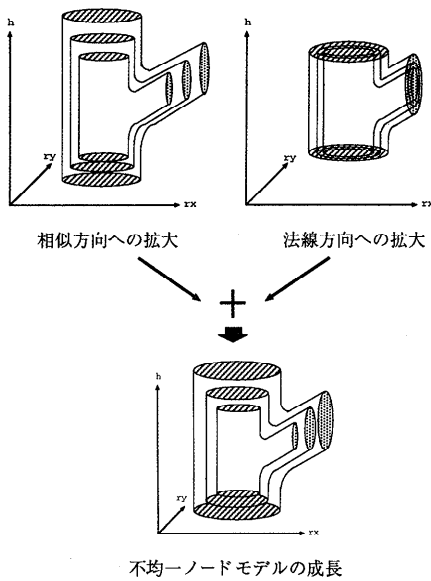


図 10 幹および枝の非等方な成長
Fig. 10 Area of connection.

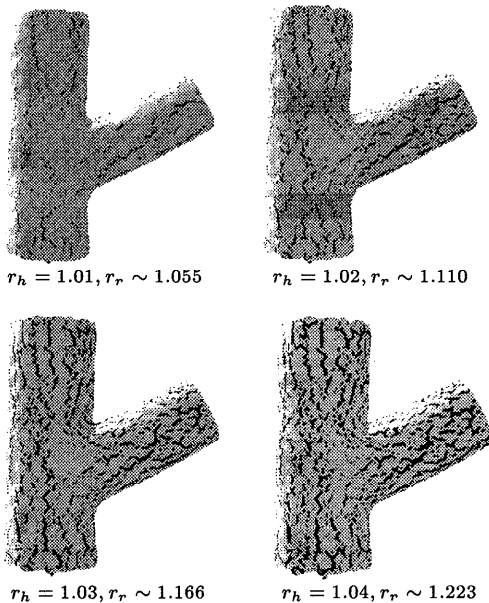


図 11 枝分かれ形状における樹皮の成長結果
Fig. 11 Result of simulation.

方向への拡大と法線方向への縮小（成長速度が負の拡大）とを組み合わせることで表現できると考えられる。

5.3 枝分かれ形状に対するシミュレーション

以上のようなモデルおよび成長方法により、ひび割れのパターンを生成した。この結果を図 11 に示す。なお、図中に示した r_h および r_r の値は、高さ（長さ）方向の成長率および幹部での半径方向のおよその

成長率である。幹部での成長率は、等方的な拡大と法線方向への拡大との両方を加味したものである。この実験により、バネモデルによるひび割れパターン生成の手法を枝分かれを持つなど複雑な形状に対しても適用できることが示された。また、幹と枝との間でのひびのつながりが、自然に実現されるなどの特徴が明らかにされた。

6. おわりに

本研究では、物理的モデルによる成長を考慮した樹皮の CG シミュレーション手法を提案した。樹木の構造に関する知見をもとに樹皮をバネのメッシュによるモデルで表現し、これを用いることで様々な種類の木のひび割れパターンおよび成長にともなうパターンの変化を表現できることを示した。

ひび割れパターンの経年変化の過程の表現は、樹木の成長における樹皮の変化の過程のアニメーション表現を可能とするものであり、樹木全体の成長シミュレーションと組み合わせることで、樹木の各部のパターンの相違なども表現できる可能性がある。このためには、樹木全体の形状の成長のモデルを導入することが必要である。これにより、新たな枝の発生や枝ごとの成長速度の違いなどを考慮することが可能になり、樹木全体にわたって各部の樹皮パターンの違いを表現できると考えられる。また、このような非常に長期の成長を考える場合、バネモデルの解像度の問題が発生する。樹木では幹や枝の太さが数倍の大きさに成長することが予想されるが、成長後の状態の表現に必要とされる解像度のモデルを成長の開始時から用いることは効率的ではない。したがって、成長にともなうモデルの中のメッシュの分割数などを変化させることが望ましい。一方、樹皮の表現のディテールに関する現実感の向上も課題である。具体的には、樹液の影響による剥離の抑制や剥離にともなう樹皮カールなどの表現を導入することが考えられる。これらの課題について、今後検討していく予定である。

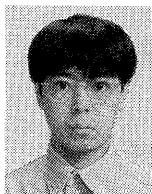
参考文献

- 1) Aono, M. and Kunii, T.: Botanical Tree Image Generation, *IEEE CG&A*, Vol.4, No.5, pp.10-34 (1984).
- 2) Bloomenthal, J.: Modeling the Mighty Maple, *Proc. SIGGRAPH'85*, pp.305-311, ACM (1985).
- 3) 堂山, 山本: 材料テクノロジー 12 構造材料 [II] 非金属系, 東京大学出版会 (1985).
- 4) Norton, A., et al.: Animation of Fracture by Physical Modeling, *Visual Computer*, Vol.7,

- pp.210-219 (1991).
- 5) Oppenheimer, P.E.: Real Time Design and Animation of Fractal Plants and Trees, *Computer Graphics*, Vol.20, No.4, pp.55-64 (1986).
 - 6) Prusinkiewicz, P., Hammel, M. and Mjolsness, E.: Animation of Plant Development, *Proc. SIGGRAPH'93*, pp.351-360, ACM (1993).
 - 7) Shimada, K.: Physically-Based Mesh Generation: Automated Triangulation of Surfaces and Volumes via Bubble Packing, PhD Thesis, MIT (1993).
 - 8) Skjeltorp, A.T. and Meakin, P.: Fracture in microsphere monolayers studied by experiment and computer simulation, *Nature*, Vol.335, pp.424-426 (1988).
 - 9) 植田：植物構造図説，森北出版 (1983).
 - 10) Weber, J. and Penn, J.: Creation and Rendering of Realistic Trees, *Proc. SIGGRAPH'95*, pp.119-128, ACM (1995).
 - 11) 安居院，福田，中島：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).
 - 12) 広田，星野，金子：物理的モデルに基づくひび割れパターンの発生，情報処理学会論文誌，Vol.37, No.12, pp.2235-2242 (1996).
 - 13) 佐藤，千葉ほか：樹木のCGシミュレーションのための樹皮のひび割れの成長モデル，平成2年度電気関係学会東北支部連合大会論文集，p.291 (1990).
 - 14) 村岡，千葉：樹木のビジュアルシミュレーションのための一樹皮生成法，平成7年度電気関係学会東北支部連合大会論文集，p.359 (1995).
 - 15) 乃万：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，グラフィクスとCAD，Vol.52, No.6, pp.35-42 (1991).
 - 16) 名取，広田，金子：バネ-マスモデルを用いたひび割れの生成シミュレーション，平成8年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集，p.397 (1996).

(平成10年4月23日受付)

(平成10年9月7日採録)



広田 光一 (正会員)

1988年東京大学工学部産業機械工学科卒業，1990年同大学院産業機械工学専攻修士課程修了，1994年同博士課程修了，1995年豊橋技術科学大学情報工学系助手。主にヒューマンインタフェースに関する研究に従事。日本機械学会，計測自動制御学会，日本VR学会各会員。



加藤 弘和

1986年長岡工業高等専門学校機械工学科卒業，同年日立通信システム(株)入社，1996年豊橋技術科学大学工学部情報工学課程入学，1998年同課程卒業，現在，日立情報通信システム(株)第一ソフトウェア部技師。主に，交換機の保守運用および現金自動預払機端末のためのソフトウェア開発に従事。



金子 豊久 (正会員)

1962年東京大学工学部電気工学科卒業，1964年同大学院電気工学専攻修士課程修了，1970年プリンストン大学電気通信工学博士課程修了(Ph.D)，同年IBM入社ワトソン研究所研究員，1982年日本IBM東京基礎研究所・サイエンティフィックセンター長など歴任，1994年豊橋技術科学大学情報工学系教授。主に医用画像処理とCGの応用に関する研究に従事。ACM，IEEE，電子情報通信学会各会員。