

# 樹木内部の繊維配向性モデルと 木目テクスチャ生成における質感表現

河 合 直 樹†

木目模様は最も代表的なテクスチャの1つであり、コンピュータグラフィクスによるソリッドテクスチャ生成技法も種々報告されている。従来の技法では木目の年輪模様の再現に注力されてきたが、年輪以外の微細組織の表現や繊維の流れに関する研究は少なく、得られる質感は十分ではなかった。本論文では樹木の内部構造に着目し、木理と呼ばれる樹木内部の繊維配向性をモデル化する。代表的な木理のパターンと一般的な木理の記述手法を示した後、レンダリング時に必要な局所的な座標変換に基づいたモデルを示す。次に微細組織の例として道管と呼ばれる鉛直な組織について、代表的なパターンのモデリング技法を示し、呈示した座標変換を作用させて表示することで、木理のモデルの妥当性を検証する。続いて微細組織の簡易的な表現として提案されている明度シフト法を、年輪構造と微細繊維組織を一元的に記述する手法として一般化し、木理による座標変換を作用させることにより、樹木構造の合理的な記述手法を提案する。最後に繊維の勾配に依存する鏡面反射モデルを導入し、木理の影響で材面に現れる光源と視点に依存する反射現象をシミュレーションする。これらの手法を導入することで、従来法よりもリアルな質感表現が可能になり、CG映像や産業デザインにおいて有用な品質高いソリッドテクスチャを生成することが可能な技法を示すことができた。

## Modeling Fiber Stream of Internal Wood and Its Application for Generating Texture of Grain of Wood

NAOKI KAWAI†

Wooden grain is one of the most representative of textures. However the solid textures of wooden grain are not enough to represent the reality of a material because of their lack of microstructures and fiber stream, with the exception of annual rings. In this paper, a geometric model is proposed for wooden grain and fiber stream by concentrating on the internal structures of wood. Representative features of wooden grain are described and geometric transformations for rendering are introduced. Geometric models of vessels are given as examples of typical microstructures. Then the effect of modeled grain is verified by calculating the image of the vessels on lumber. The shifting brightness technique is also extended as an easy way to express microscopic fibers. It is integrated technique for expressing all the vertical structures including the annual rings. Finally a specular reflection model which depends on the gradient of fibers is introduced. Then cross grain, which is an anisotropic reflection caused by varied fiber gradients, is simulated. This new procedure can generate more realistic wooden textures than before. This procedure makes it possible to provide high-quality solid textures which are useful for CG production and industrial designs.

### 1. はじめに

木は我々にとって最も身近な素材の1つであり、古くから家屋や家具、道具、工芸品などの材料として広く用いられてきた。木はその機能性や加工性、経済性など多くの点で長所を持つ素材であるが、同時に木目模様の持つ美しい風合いが素材としての大きな特長となっている。我々は木目模様の独特な表情に安らぎや

暖かみを感じ、この素晴らしい自然の造形を生活の様々な場面に取り入れてきた。このように我々の生活とかかわりの深い木目模様は、コンピュータグラフィクス(CG)を用いた映像の中でも重要な素材として使われている。CGではリアリティ向上のためにテクスチャマッピングが多用されるが、木目模様は最も多用されるテクスチャの1つである。

テクスチャマッピングの素材として使われるテクスチャは、あらかじめ画像データとして準備する必要があるが、実際の素材や撮影したフィルムをスキャナ入力して用意することが多い。最近ではデジタル素材集

† 大日本印刷株式会社 C&I 研究所  
Communication and Information Labo., DaiNippon  
Printing Co., Ltd.

も豊富に販売されている。テクスチャマッピングは手軽で効果的な反面、マッピングされた模様不連続や歪みが生じやすいという欠点を持つ。この現象は2次元のテクスチャを3次元空間上のオブジェクト表面に対応付けることによる、対応付けの矛盾や、マッピングの写像が非線形であることが原因となっている。この欠点を回避して連続的で歪みのない模様面を生成する手法として、ソリッドテクスチャが提案されている。

ソリッドテクスチャによる表現では、あらかじめ3次元連続空間に反射率などの属性を定義しておき、オブジェクトの3次元座標値より参照した属性をレンダリングに使用する。これにより不連続や歪みの問題を回避でき、実際の素材からオブジェクトを切り取る場合と同様に矛盾のない模様付けが可能となる。ソリッドテクスチャではレンダリング時には機械的に属性を参照するため、ソリッドテクスチャを3次元空間に定義する段階でいかに対象物をリアルに表現するかが生成画像に影響を与える。

木の年輪は基本構造が同軸円柱状であるため数学的な扱いが比較的容易であり、ソリッドテクスチャ研究の初期から研究対象とされてきたが、従来は主に年輪模様の再現に注力されてきた。一方、実際の木材では、年輪が他の模様と比較して目立たないものや年輪の存在がはっきりと認められないものも多いが、いずれの場合でも我々は木であることを認識し、自然と安らぎや暖かみを感じ取っている。すなわち年輪以外の要素を用いて木目らしさを表現することが重要であるが、このようなアプローチはほとんど試みられていない。

本研究では年輪以外の要素に着目し、木目模様をよりリアルに生成することを試みる。これにより木目模様を用いたリアルなCG画像やアニメーション制作、壁紙などの産業デザイン一般に有用であると考えられる。

以下、2章でこれまで報告されている木目模様のソリッドテクスチャリングについて振りかえり、3章で樹木内部の一般的な構造をまとめた後、4章にて繊維配向性をモデル化する。5章では微細組織の例として道管のモデリング技法を導入し、6章では年輪を繊維の反射率変化として扱うことで軸方向組織の一元的な記述技法を示す。最後に7章で木材面に現れる、動きのある鏡面反射のレンダリングを試みる。

## 2. 木目テクスチャの表現技法

木目模様のソリッドテクスチャは、3次元空間に同軸円柱状の年輪を幾何学的に定義し、フラクタルなどの技法で空間的変位を与える方法が一般的であり、これにより一定のリアリティが実現されている。

Peachey<sup>2)</sup>は3次元ソリッドテクスチャの概念を導入した報告の中で、木目模様を生成する手法を紹介している。ここでは曲面上の空間座標から幾何学的に定義された同軸円柱の属性を参照することにより、年輪状の模様が任意曲面上で矛盾なく表現できることが示された。鶴岡ら<sup>3)</sup>は同軸円柱状の構造を生成するために、ポテンシャル場の等電位面を利用する手法を提案した。佐々木<sup>6)</sup>は年輪を記述するためにスキャンした木口面の画像を挿引する技法を提案した。岡田ら<sup>4)</sup>は3次元フラクタル場を用いた座標変換を同軸円柱に適用することで、年輪の揺らぎを表現する技法を示した。桃井<sup>8)</sup>は枝分かれにおける年輪の3次元的な構造モデルを提案し、節模様の生成手法を示した。これらの手法は主に年輪模様の再現に着目しているが、年輪以外の構成要素のモデリングは報告されていない。

桃井は繊維の質感を表現するために、2次元のノイズパターンを樹軸方向に投影して木材の明度を変化させる方法を提案し、直線的ではあるが一定の質感を表現している。しかし実際の樹木では繊維組織は揺れをとまって配向しており、木材表面上で流れを形成して複雑に見える。さらに木材は照明や観察方向により変化する、もくと呼ばれる反射を持つ。繊維の流れやもくは樹木内部の繊維配向性に起因しているが、繊維配向性のモデル化は報告されていない。

## 3. 樹木内部の構造<sup>1)</sup>

### 3.1 樹木内部の巨視的構造

樹木は幹と呼ばれる円柱体を中心に構成されており、構造が比較的単純な針葉樹では、幹内部は図1のように中心から髄・木部・樹皮という3構造を成している。木部と樹皮の間の繊維束形成層で木部が肥大成長する。

木部の層は成長輪と呼ばれる1生長期に生長した環状の層から形成されるが、温帯のように1年1生長期の場合の生長輪を特に年輪と呼ぶ。年輪の中で、密度が低く淡色で細胞の大きい部分を早材と呼び、密度が高く濃色で細胞の小さい部分を晩材と呼ぶ。熱帯林や広葉樹では年輪が曖昧なものも多く、針葉樹でも早材から晩材への移行の緩急、晩材幅、晩材の密度などは樹種により大きく異なる。

### 3.2 広葉樹内部の微視的構造

樹木の木部は無数の繊維細胞から構成されているが、受け持つ役割により機能分化が進んでいる。機能分化は広葉樹において顕著に見られ、特に目立って現れる組織に道管と放射状組織があげられる。

道管は道管要素と呼ばれる円筒状の細胞が上下に連

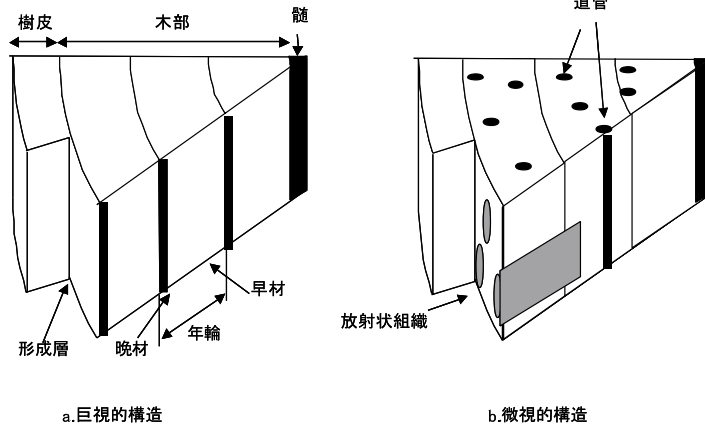


図1 樹木内部の構造

Fig. 1 Structure of internal wood.

なって構成されており、木口面では大きな円孔となる。直径は樹種により  $20 \sim 400 \mu\text{m}$  程度とかなり幅がみられる。道管の分布にはいくつかのパターンがみられるが、代表的なものに年輪界に沿って大きな道管が並んでいる環孔材や、木部全体にわたって道管の大きさや配列がほぼ一様な散孔材がある。

樹軸から放射方向に配列する組織を総称して放射状組織と呼ぶ。ミズナラの放射断面では顕著に現れ、とらふ(虎斑)と呼ばれている。

### 3.3 樹木内部の繊維配向性

木部組織や道管などの軸方向要素の配列は、厳密に軸方向に一致して配向するのではなく、樹軸を中心として傾いたり波打ったりする傾向がある。この繊維配向性は木理と呼ばれ、軸方向の配列が樹軸に平行である場合を通直木理、平行でない場合を総称して交走木理と呼ぶ。交走木理がみられる樹木から製材した木材では、木材表面で繊維の勾配が不均一になり、これが模様となって現れる。交走木理の代表的なものに、らせん木理、交錯木理、波状木理があげられる。

らせん木理では軸方向要素が樹軸に対してらせん状に配列する。交錯木理(図2a)では軸方向要素が交互に反対方向に傾斜して配列し、放射断面においてリボンもしくは呼ばれる帯状模様を形成する。波状木理(図2b)では軸方向要素が波状に配列、木材面において波状もしくは呼ばれる縞模様を形成する。一般の交走木理ではこれら代表的な木理が様々に複合し、木材面で複雑な模様を見せる。

## 4. 座標変換による木理のモデル

### 4.1 座標系の導入と木理の記述

樹木は同軸円柱状の構造を有しており、図3aに示

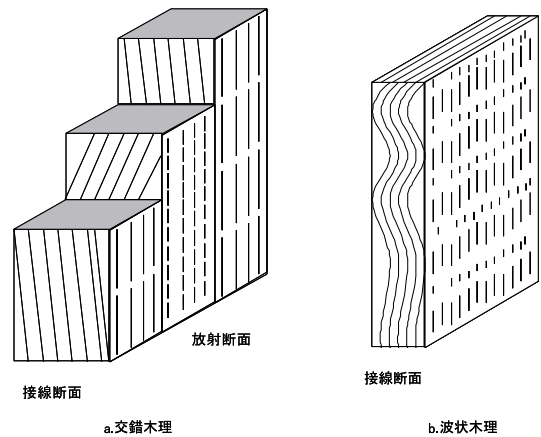


図2 交錯木理と波状木理

Fig. 2 Interlocked grain and wavy grain.

す円柱座標系を用いることで簡潔に記述することができる。

樹木を完全な円柱と仮定すると、同軸円柱状の肥大生長により、 $r =$ 一定で定義される円筒面は同一時期に形成された繊維束で形成されていると考えることができる。すなわち1本の繊維束は  $r =$ 一定面内で配向すると考えられる。図3bのように  $r =$ 一定面 ( $\theta y$  面) 内での繊維の配向を考えると、この面内での繊維勾配は位置  $(\theta, y)$  の関数となる。すなわち  $y$  に対する  $\theta$  方向への勾配として記述することができ、 $d\theta/dy = G(\theta, y)$  と定義する(図3c)。ここで  $G(\theta, y)$  は  $y$  方向に連続的に変化するが、 $\theta y$  面で同一径の繊維が敷き詰められた状態では  $G$  は  $\theta$  の変化に対してほぼ一定であると考えられ(図3b)、 $G$  は  $y$  のみの関数  $G(y)$  で表現することができる。

以上を  $r$  方向に拡張すると、木理は繊維勾配関数

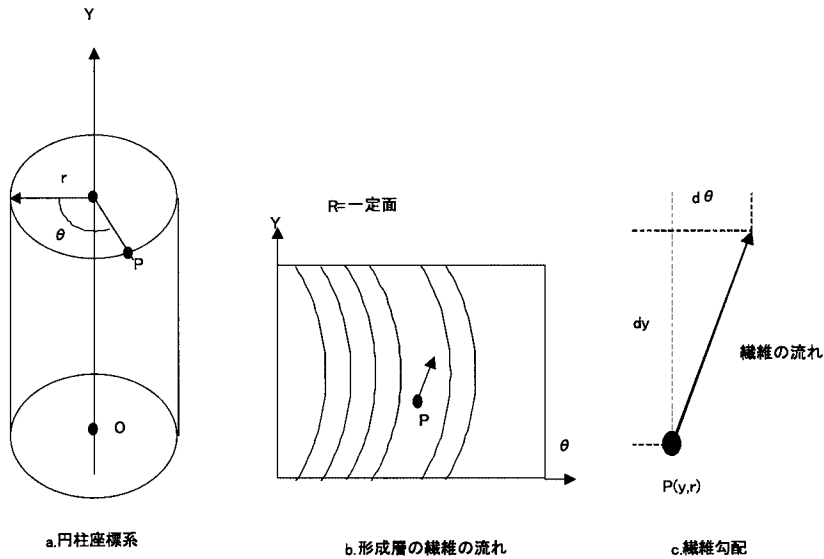


図3 円柱座標系と繊維勾配

Fig. 3 Cylindrical coordinate system and gradient of fiber.

$G(y, r)$  として記述できる。肥大生長は連続的なものであるため、 $G(y, r)$  は  $r$  方向へも連続的であると考えられる。

#### 4.2 木理による繊維勾配モデル

ここではらせん木理と波状木理および一般的な木理について幾何学的な性質を考察し、繊維勾配関数  $G(y, r)$  を記述する。

らせん木理において  $y$  に対する  $\theta$  方向の平均的な勾配を  $g1$  とすると、 $G_s(y, r) = g1$  と記述できるが、勾配は完全に一様ではなく  $y$  と  $r$  に依存して変動する。変動値を  $\Delta g(y, r)$  とすると、 $G_s(y, r) = g1 + \Delta g(y, r)$  と記述することができる。  $g1$  はこの樹木の平均的な勾配であるから定数となる。  $\Delta g(y, r)$  は、 $y, r$  の双方向に連続的であればよく、フラクタルノイズなどを利用して自然な揺らぎを表現することができる。

波状木理では  $y$  に対する  $\theta$  方向の振動について、波長  $\lambda$  と振幅  $A$  が完全に均一の場合、 $G_w(y, r) = A \sin(y/\lambda)$  となる。らせん木理と同様に  $y$  と  $r$  に依存する変動値を考慮すると、 $G_w(y, r) = A \sin(y/\lambda) + \Delta g(y, r)$  と記述することができる。

一般的には、木理は  $y$  に依存する基本性質と  $y$  および  $r$  に依存する変動分の和で表すことができ、

$$G(y, r) = g(y) + \Delta g(y, r) \quad (1)$$

と定義することができる。

#### 4.3 レンダリング時の属性の参照

通直木理ではすべての軸方向要素が  $y$  軸方向に配列するため、地表面  $y = 0$  における木口面での位置  $(r, \theta, 0)$  に対して反射率や透明度などの属性情報

$C(r, \theta)$  を定義しておけば、レンダリング時のローカル座標値  $(r, \theta, y)$  より属性  $C(r, \theta)$  を直接参照することができる。

交走木理では  $y = 0$  にて  $(r, \theta, 0)$  に存在する繊維は、 $y$  の増加に対して式 (1) を満たしつつ  $\theta$  の値を増減させる。レンダリングに先立って  $y$  に対する  $\theta$  の位相関数、

$$\begin{aligned} \phi(r, y) &= \int \{G(y, r)/r\} dy \\ &= \int [\{g(y) + \Delta g(y, r)\}/r] dy \quad (2) \end{aligned}$$

を算出しておき、レンダリング時のローカル座標値  $(r, \theta, y)$  から式 (2) により位相  $\phi(r, y)$  を求める。これより  $y = 0$  において  $C(r, \theta - \phi)$  に定義されている反射率などの属性情報を参照することで、木理を作用させたレンダリングが可能になる。

#### 4.4 年輪の揺らぎに対する木理の表現

以上の議論では年輪は完全な同軸円柱であることを前提としたが、実際の樹木では年輪は  $\theta$  に依存して径が変化する。各年輪層は同一時期に形成されたものであり、 $\theta$  に依存した時期  $t$  の年輪半径を  $r = R(t, \theta)$  と表す。半径関数  $R$  についてはフラクタルなどの手法を用いて自由に定義することができる。

逆に  $R(t, \theta)$  を変形して、 $t = T(r, \theta)$  を定義しておけば、空間座標の  $(r, \theta)$  から形成時期  $t$  を特定することができる。前述した繊維の反射率などの属性は、本質的には形成時期  $t$  と方向  $\theta$  に依存するものであるから、繊維勾配関数  $G(r, y)$ 、属性定義関数  $C(r, \theta)$

をそれぞれ,  $G'(t, y) = g'(y) + \Delta g'(t, y)$ ,  $C'(t, \theta)$  と記述することとする. 式 (2) は形成時期関数  $T(r, \theta)$  を導入することで,  $(r, \theta, y)$  の関数として表現することができる.

$$\phi(r, \theta, y) = \int [\{g'(y) + \Delta g'(y, t)\} / R(t, \theta)] dy \tag{3}$$

これにより交点座標の  $(r, \theta, y)$  から  $\phi(r, \theta, y)$  を算出しておき,  $C'(T(r, \theta), \theta - \phi)$  の属性を参照することで木理と年輪の揺らぎを同時に作用させたレンダリングが可能になる.

### 5. 道管のモデリングと木理の作用

#### 5.1 代表的な道管分布

樹木の内部で最も特徴的な鉛直方向の組織として道管があげられる. 道管は樹種により樹木内部での配列に傾向がみられるが, 代表的な配列に図 4 に示す散孔材および環孔材があげられる.

散孔材は樹木全体にわたって道管の大きさや配列がほぼ一様な材で, クルミ, カバ, サクラなどにみられる. 環孔材は年輪のはじめに他の部分と比べて直径が著しく大きい道管ができる材で, ミズナラ, ハルニレ, ケヤキなどにみられる.

#### 5.2 道管形状の記述

1本の道管は木口面における円筒の中心座標と半径の3変数で記述する. 道管の中心座標は直交座標系でも極座標系でも記述可能であるが, 直交座標系では3変数  $(x_v, y_v, z_v)$  で記述することができる.

#### 5.3 散孔材の分布モデル

散孔材では位置と道管密度について明確な相関が認められず, 一様に分布すると考えられる. 単位面積あたりの道管分布の面積密度を  $\rho$  とすると, 道管を定義する領域  $x_{\min} < x < x_{\max}$ ,  $y_{\min} < y < y_{\max}$  に分布する道管数  $n$  は,  $n = \rho \times \{(x_{\max} - x_{\min}) \times (y_{\max} - y_{\min})\}$

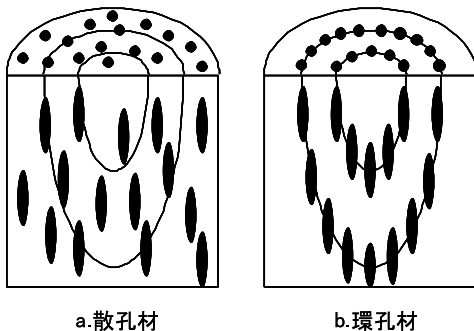


図 4 散孔材と環孔材

Fig. 4 Diffuse-porous wood and ring-porous wood.

で与えられる.  $n$  本の道管について  $(x_v, y_v)$  を定義するため, 以下の式を用いて定義領域内に2次元的一様分布させる.

$$x_v = R(1, 0) \times (x_{\max} - x_{\min}) + x_{\min}$$

$$y_v = R(1, 0) \times (y_{\max} - y_{\min}) + y_{\min}$$

ここで関数  $R(1, 0)$  は,  $[0, 1]$  の範囲で一様分布する乱数を出力する. 各道管の半径については平均半径と分散を与えて, 正規分布乱数により決定する.

図 5 に上記分布モデルにより配列させ, 通直木理, らせん木理, 波状木理により座標変換を行って切断した場合の, 材面における道管の現れ方を示す. 図ではらせん木理の平均勾配を  $g1 = 0.12$  とし, 変動値  $\Delta g$  の最大値は  $0.02$  としてフラクタルを利用して揺らぎを与えた. 波状木理の波長と振幅は  $\lambda = 40.0$  (mm),  $A = 0.20$  (mm) とし,  $0.02$  を最大として勾配のゆらぎ  $\Delta g$  を作用させている. 切断シミュレーションでは, 交点計算の後に式 (3) を用いて参照すべき属性のローカル座標値  $(r, \theta)$  を算出し, さらに直交座標系  $(x, y)$  に変換する. すべての道管  $i$  について, 道管の中心座標  $(x_{v_i}, y_{v_i})$  と半径  $r_{v_i}$  について, 不等式  $(x_{v_i} - x)^2 + (y_{v_i} - y)^2 < r_{v_i}^2$  の真偽を求め, 少なくとも1本の道管について成立した場合を黒で表示した.

#### 5.4 環孔材の分布モデル

$(t, \theta)$  面における1年の樹体の生長半径を  $d$  ( $= 1$  年) とし, 年輪界における単位長あたりの道管分布数を線密度  $P$  で与える.  $j$  年目の年輪界の髄からの半径は  $j \times d$  で与えられ,  $j$  年目の年輪界に配置される道管数は  $P \times j \times d$  本となる. これより  $j$  年目の年輪界での  $k$  番目の道管の中心座標を次の式により極座標系で与えることができる.

$$r(j, k) = j \times d, \quad \theta(j, k) = 2\pi \times k / (P \times j \times d)$$

このとき, 各道管位置に一定の範囲内で変動を与えることにより, 自然な配列を表現することができる.

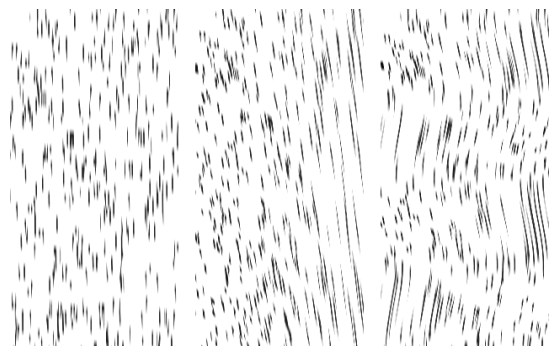
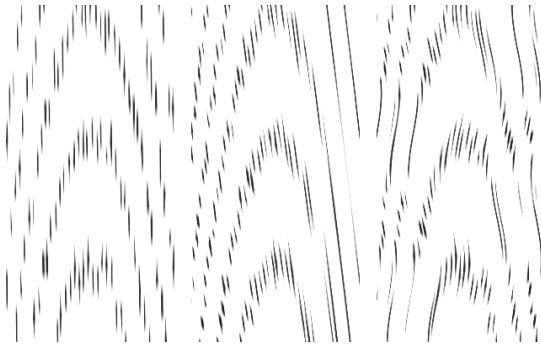


図 5 木理による散孔材

Fig. 5 Diffuse-porous wood depending on grain.



a. 通直木理      b. らせん木理      c. 波状木理

図 6 木理による環孔材の道管

Fig. 6 Ring-porous wood depending on grain.

図 6 に上記分布モデルにより配列させ、通直木理、らせん木理、波状木理により座標変換を行って切断した場合の、材面における道管の現れ方を示す。環孔材の道管は  $(t, \theta)$  面で定義したため、交点計算では  $R(t, \theta)$  を利用して中心座標を空間座標に変換する。らせん木理と波状木理の記述に用いたパラメータは、図 5 の場合と同一である。

## 6. 微細組織の表現

### 6.1 鉛直な投影による明度シフト法

桃井<sup>8)</sup>は年輪表現による巨視的な色変化に加えて、繊維の個体差が作る微視的な色変化を表現するために、明度シフトによる簡易的な質感表現方法を提案している。この手法ではあらかじめ 2 次元配列にノイズを格納しておき、これを鉛直方向に ( $y$  方向に) 投影マッピングすることにより、画像の明度を一定の範囲内でシフトさせる。一定の 2 次元領域を反復して利用することにより、わずかなメモリで微細組織の表現が可能であり、計算コストに関しても 2 次元の座標値に対する剰余計算だけで実現できるため、少ない負荷でリアリティを向上させることが可能である。一方で、鉛直に投影される繊維はすべて同一長の直線として木材面に現れる結果となり、得られるリアリティには限界がある。

### 6.2 明度シフト法への木理の導入

鉛直方向への投影による明度シフトでの繊維様の質感は、向きの揃った線分の集合として描画されるが、これは年輪パターンの揺らぎと相関がなく、不自然な印象を与える結果となる。また天然木材の表面を観察した場合に認められるような、個々の繊維で異なる見かけの長さも表現することができない。繊維の見かけの長さは、木理に起因する材面上の繊維勾配の変化に対応した切断角度に依存して変化する。

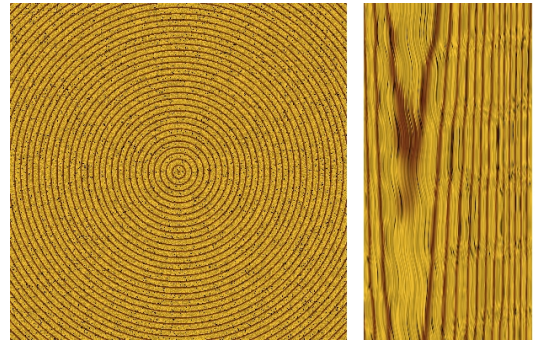


図 7 木口面とテクスチャの生成例

Fig. 7 Cross section and generated texture.

4 章でモデル化した木理の座標変換を明度シフト量の投影に作用させることで、繊維質感をよりリアルに表現することが可能になる。これは以下の手順で計算が可能である。

- (1) 視線とオブジェクトの交点座標の計算
- (2) 交点座標を局所座標系に変換
- (3) 局所座標系での木理および揺らぎによる座標変換
- (4) 局所座標系での座標値よりノイズ値を特定

### 6.3 2 次元配列を用いた反射率の一元的な記述

明度シフト法の配列を拡張し、モデリング対象の樹木全体の年輪と繊維質感を木口面における像として一元的に記述することが可能である。これにより、放射方向の反射率変化だけでなく、円周方向に変化を付けた反射率変化や繊維質の擬似表現を記述することもできる。前節の手順によりレンダリング時に揺らぎおよび木理の座標変換が作用するため、木口面 ( $t\theta$  面) には同心円状に反射率の変化としての年輪を記述することができ、反射率定義の手続きは  $(t, \theta)$  の関数となる。

図 7 に、2 次元配列上に定義した年輪およびノイズパターンと、レンダリング結果を示す。ここでは年輪パターンによる反射率変化に 40% を限度として画素ごとに独立な明度シフト量を加算している。また波状木理のパラメータは  $\lambda = 15.0$  (mm),  $A = 0.15$  (mm) とした。レンダリング結果では、木理と揺らぎにより現れる、繊維長や繊維角度の変化が確認できる。

## 7. もくのレンダリング

### 7.1 もくの本質

天然の樹木ではもくと呼ばれる異方性反射が生じるが、これは木理による木材切断面での繊維勾配の不均一な分布に起因することが知られている。

木材を微視的に観察すると、表面は鋭角に切断され

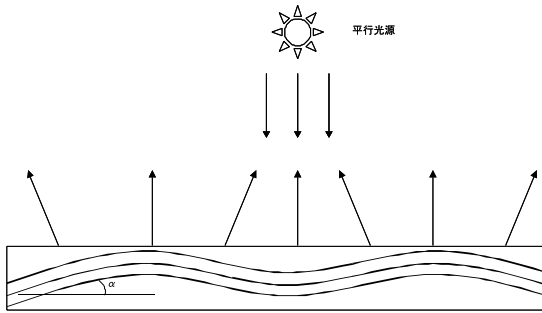


図8 木材表面での反射

Fig. 8 Reflection on lumber surface.

た無数の繊維細胞の集合から構成されている。繊維細胞は細長い円筒状であるため、その切り口では細胞内壁が勾配を持って現れる。図8に示すように、繊維細胞の方向ベクトルと木材の切断面との交差角度  $\alpha$  を潜り角と呼ぶことにする。木材表面における繊維潜り角は、木理により不均一な分布を示すため、反射特性は位置に依存することとなり、これが巨視的にはもくとなって現れる。繊維細胞の内壁では、比較的強い鏡面反射を示すため、もくは入射角度や視線方向に強く依存した鏡面反射を示す。

### 7.2 繊維による異方性反射

一般の微細な筋状の凹凸構造からなる面の異方性反射について Poulin<sup>5)</sup>は微視的な反射の考察に基づいた反射モデルを提案している。木材の表面に現れる細胞内面は Poulin の円筒内面を用いたモデルに類似するが、Poulin のモデルでは潜り角を扱うことができない。Banks<sup>9)</sup>は1次元と2次元の複合からなる形状が起こす異方性反射を再現して髪の毛や毛皮を表現する技法を示した。一方で場を可視化する一般的な手法として Cabralらによって導入された LIC (Line Integral Convolution) が知られている<sup>7),10)</sup>。LIC の応用例の中では、静電界を繊維状に可視化した例などが報告されている。

木材表面の反射を正確に扱うためには、微細構造からの直接的な反射だけでなく、半透明の細胞壁による内部からの多重反射を考慮する必要がある。本研究では反射の詳細には立ち入らず、次節に示す簡易的な反射モデルにより、木理の影響で照明角度によりもくの形状が変化することを確認する。

### 7.3 もくのレンダリング

本節ではもくの形状変化を確認するための簡易的な反射モデルを導入する。鏡面反射は円筒内面上の細胞壁により起こると仮定し、鏡面反射成分の計算に用いる法線ベクトルを繊維潜り角に応じて変動させる。拡

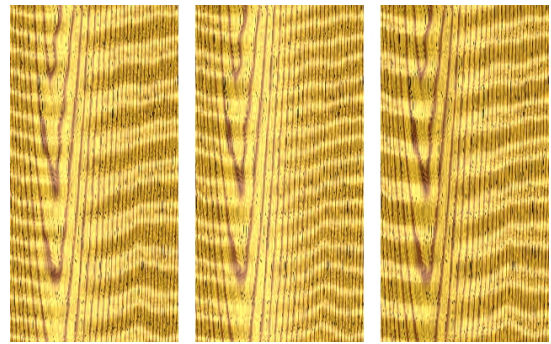
a.  $\delta = 7.2^\circ$ b.  $\delta = 0.0^\circ$ c.  $\delta = -7.2^\circ$ 

図9 もくのレンダリング例

Fig. 9 Generated moving reflection.

散反射は微細組織による乱反射の結果として考えられるため、木材面の法線をそのまま用いて計算する。入射光強度  $L_I$  に対する反射光強度  $L_O$  を、

$$L_O = k_d L_I \cos \delta + k_s L_I \cos^n(\delta - \alpha) \quad (4)$$

とする。ここで  $k_d$  および  $k_s$  は拡散反射および鏡面反射の反射係数、 $n$  は鏡面反射の鋭さを表す。また  $\delta$  は光線の入射角で樹体の上方を正、 $\alpha$  は繊維潜り角で樹体の上方への潜り込みを正とする。

図9にレンダリング例を示す。この例では波状木理のパラメータを  $\lambda = 20.0$  (mm)、 $A = 0.15$  (mm) とし、木材の法線方向に視点を固定し、平行光源の照射角度を  $7.2^\circ$  刻みで変化させ 30%の鏡面反射成分を加えている。これより照射角度によりもくの形状が変化することが確認できる。

## 8. まとめと今後の課題

本研究では樹木のソリッドテクスチャリング技法について、よりリアルな木目模様の生成を試みた。

まず、木理と呼ばれる樹木内部の繊維配向性を3次元空間内の座標変換としてモデル化した。次に微細組織の例として道管のモデリングを試み、続いて木口面に年輪と繊維の濃淡を同時に定義し、木理を作用させて投影することで、繊維質感をリアルに表現した。さらに木理に起因して現れる繊維潜り角の分布を計算し、もくと呼ばれる光源と視点に依存する反射を表現した。今後の研究課題として以下の点が考えられる。

- 樹木は年輪や道管以外にも、放射組織など様々な組織が複合されて形成されており、これらを忠実にモデリングすることが必要である。
- 細胞壁はたいへん薄く半透明壁層をなしており、円筒内面の異方性反射や半透明層からの多重反射、空気層との屈折を考慮した正確な反射モデルが必要である。本研究では材面に現れる繊維潜り角を

1 自由度で表現したが、正確には 2 自由度の配向性を考慮する必要がある。また木材はサンディングや塗装による質感の変化が顕著であり、表面処理を考慮した反射モデルの構築が望ましい。

- 樹木は樹種により構成要素の特性が大きく異なるため、樹種ごとのパラメータをデータベースに持つことで、樹種を特定した表現が可能になると考える。

### 参 考 文 献

- 1) 島地 謙ほか：木材の構造，文永堂出版 (1985).
- 2) Peachey, D.R.: Solid Texturing of Complex Surfaces, *Proc. SIGGRAPH '85*, pp.279–286 (1985).
- 3) 鶴岡，新帯，木村，横井，三宅：ポテンシャル法を用いた木目の表示方法について，*NICOGGRAPH '85 論文集*，pp.83–88 (1985).
- 4) 岡田 稔，横井茂樹，鳥脇純一郎，堀 健二：3次元ランダムフラクタルを利用した不均質材料のテクスチャ表現，*情報処理学会論文誌*，Vol.28, No.11, pp.1146–1153 (1987).
- 5) Poulin, P. and Fournier, A.: A Model for Anisotropic Reflection, *Proc. SIGGRAPH '90*, pp.273–282 (1990).
- 6) 佐々木尚孝：木口面画像を用いた針葉樹林のシミュレーション，*情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会報告*，Vol.52, No.14, pp.93–98 (1991).
- 7) Cabral, B. and Leedom, L.: Imaging Vector Fields Using Line Integral Convolution, *Proc. SIGGRAPH '93*, pp.263–270 (1993).
- 8) 桃井貞美：枝分かれを考慮した木目の表現手法，*情報処理学会論文誌*，Vol.35, No.3, pp.461–467 (1994).
- 9) Banks, D.C.: Illumination In Diverse Codimensions, *Proc. SIGGRAPH '94*, pp.327–334 (1994).
- 10) Stalling, D. and Hege, H.C.: Fast and Resolution Independent Line Integral Convolution, *Proc. SIGGRAPH '95*, pp.249–256 (1995).

(平成 11 年 8 月 31 日受付)

(平成 12 年 2 月 4 日採録)



河合 直樹 (正会員)

昭和 63 年名古屋大学工学部電気学科卒業。平成 2 年同大学院工学研究科修了(情報工学専攻)。同年大日本印刷(株)入社。現在同社 C&I 研究所にて、コンピュータグラフィクス

のデザイン分野への応用に関する研究に従事。IEEE, ACM SIGGRAPH 各会員。