

## 樹木内部の繊維勾配分布測定方法と木目 CG モデルへの適用

河合 直樹

大日本印刷株式会社

E-mail: Kawai-N@mail.dnp.co.jp

CG における木目テクスチャ生成については種々の手法が提案されているが、樹木内部の繊維勾配の変化を考慮することにより、木目表面の繊維質の不均一な流れや照りと呼ばれる反射特性を表現することが可能となり、リアルな木目表現のために有効な手法となっている。一方でこの繊維勾配分布は通常意識する機会がなく、自然な分布を手作業によりデザインしたり手続的に生成したりすることが困難である。本手法では実在する木材表面上の繊維勾配分布を測定し、3次元樹木モデル内部の繊維勾配分布としてマッピングすることで、よりリアルな木目テクスチャを容易に表現することを可能とした。

## Measuring fiber gradient on lumber surface and mapping gradient into wooden grain model

Naoki Kawai

Dai Nippon Printing Co., Ltd.

E-mail: Kawai-N@mail.dnp.co.jp

Considering fiber stream of internal wood is an effective way to generate photo realistic images of wooden surface grain, which makes it possible to represent uneven stream of fibers on lumber surface and complex reflection called 'figure'. However, such a stream is unfamiliar for us and it is difficult to express the natural fiber stream by handwork or procedural means. In this paper we present an easier method for rendering realistic wooden textures by measuring the distribution of fiber gradient on lumber surface and mapping it into three-dimensional geometry as fiber stream of internal wood.

### 1. はじめに

木は我々にとって最も身近な素材のひとつであり、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、意匠としての木目模様の持つ美しい風合いが特長となっており、コンピュータグラフィクス (CG) による映像制作においても最も多用されるテクス

チャのひとつとなっている。

CG における物体表面のテクスチャ表現の代表的な手法にテクスチャマッピングがあげられる。テクスチャマッピングでは表現したいテクスチャの2次元画像を用意して3次元空間のオブジェクトに対応付けるため、手軽で効果的な手法であるが、模様你不連続や歪みが生じやすいという欠点を持つ。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が、色や反射特性などの属性を手作業また

は手続き的な手法などにより 3 次元的に定義することは、一般的に容易ではない。

本研究では、木目模様のソリッドテクスチャリングにおいて、リアルなモデリングが特に困難である樹木内部の繊維配列を対象として、実際の木材のサンプルから繊維の勾配分布を計測し、3次元モデルに取り込むことにより容易にリアリティを向上する試みを行ったのでその結果を報告する。

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の技法を振り返り、本研究のアプローチを示す。その後3章で樹木内部の繊維配向についての表現モデルを示し、続いて4章で実物の木材表面から繊維の勾配分布を計測する手法を提案する。最後に5章では計測結果を樹木の3次元モデルに適用して樹木内部の繊維勾配を再構成してレンダリングした結果を示す。

## 2. 従来の表現技法と本研究の指針

### 2.1 従来の表現技法

ソリッドテクスチャを用いた木目模様の表現は古くから研究されており、Peachey [1] 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、幾何学的に定義した同軸円柱の中心軸からの距離に応じて着色することにより、年輪状の模様が任意曲面上に矛盾無く表現できることを示した。岡田ら [2] は3次元フラクタル場を用いて同軸円柱に座標変換を施すことで、年輪の揺らぎを表現する技法を示した。桃井 [3] は木目表面の繊維質感を表現するために、木口面に定義した2次元のノイズパターンを樹軸方向に投影して、微細な明度変化を表現する手法を提案した。さらに河合 [4] は樹木内部に存在する木理と呼ばれる繊維細胞の走行方向の変化に着目し、複雑な繊維質感のリアルな表現やもくと呼ばれる反射特性の表現技法を提案した。

### 2.2 本研究の指針

上述した木理の概念の導入は木目テクスチャのリアルな表現において不可欠な要素となるが、木理

の流れは日常的に観察する機会がなく、わずかに木材の切断面における反射特性として、もくにより間接的に観察する程度である。そのため、樹体の内部に走行する繊維勾配を3次元的に連続して手作業でデザインしたり、手続き的なモデリング技法を妥当に設計したりすることは難しい。

本研究ではこの問題を解決する試みとして、実物の木材面から繊維の勾配分布を測定し、その分布を3次元樹体モデルの空間的歪として取り入れる手法を提案する。実物の木目からキャプチャーした属性情報を3次元モデルに取り込む試みとしては、佐々木 [5] によって木口面をスキャンした画像を樹軸方向に掃引した立体を構成し、それを任意面で切断して年輪模様を表現する手法が報告されている。

## 3. 樹木内部の繊維配向モデル [6]

### 3.1 樹木の基本構造

樹木は幹と呼ばれる円柱体を中心に構成されており、幹内部は中心から髄・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。

木部の層は無数の繊維細胞から構成され、生長輪と呼ばれる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。

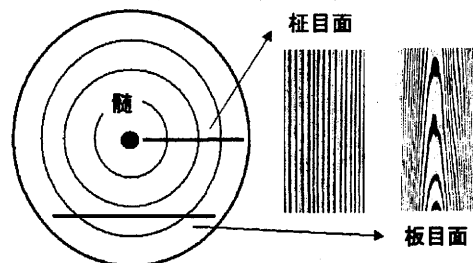


図1. 柱目面と板目面

木材の断面の代表的なものに柱目面と板目面があげられる。柱目面は幹軸に平行で髄を通る放射方

向の断面で、年輪がほぼ平行に現れる。板目面は幹軸に平行で幹の円周に対して接線方向の断面で、年輪が放射線状に現れる。

### 3.2 樹木内部の繊維配向性

木部を構成する繊維組織は、樹体の軸方向に厳密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。この軸方向の配列が樹軸に平行である場合を通直木理(図2.a)、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形態に、らせん木理、交錯木理、波状木理があげられる。

らせん木理(図2.b)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くと呼ばれる帯状模様を形成する。波状木理(図2.c)では軸方向要素が波状に配列し、木材面において波状もくと呼ばれる縞模様を形成する。一般の樹木ではこれらの木理が様々に複合し、木材面で複雑なもくを見せる。

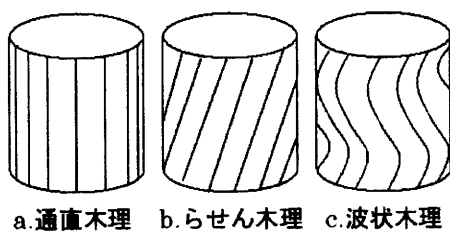


図2. 代表的な木理

### 3.3 もくの発現原理

上述した木材のもくは、視覚上は表面色の濃淡として観察することができる。ただしこの濃淡模様は木材と光源方向および視点の位置関係により、変化するという特徴を持つ。これはもくの発現は、年輪に見られるような反射率の相違に起因するものではなく、方向性を持った反射特性によるものである

ことを示している(図3)。

木材を微視的に観察すると、表面は厳密な平面ではなく、鋭角に切断され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り、切断面に現れる細胞内壁は比較的大きな鏡面反射成分を持っている。すなわち、巨視的には平面状である木材表面は、実際には微小な無数の鏡面から構成されていると考えることができる。微小鏡面は木理に起因した勾配を持って現れるが、勾配は木理によって不均一な分布を示すため、入射角度や視線方向に依存して複雑に変化するもくを示す。

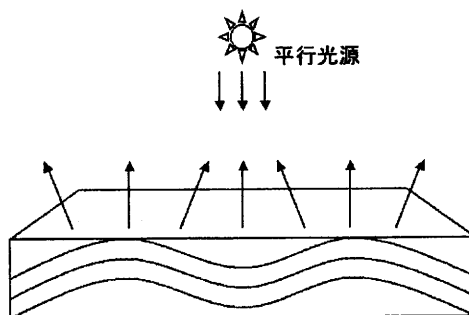


図3. 木材表面の反射特性

### 3.4 樹木内部の幾何モデル

本研究では樹木内部の繊維配列を表現するために、図4に示す円柱座標系に基づいた幾何モデルを用いる。樹体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、 $r$ が一定の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本の繊維は $r$ が一定の面内を走行するとみなすことができ、図4.bに示すように繊維の勾配 $d\theta/dy$ は $g(\theta, y)$ で表すことができる。一方で、 $r$ が一定の面では無数の繊維が $\theta$ 方向に並列して敷き詰められた状態であり、 $g$ は $\theta$ の変化に対してほぼ一定であるとみなすことにより、 $g$ は $y$ のみの関数 $g(y)$ で表すことができる。

以上を $r$ 方向に拡張すると、樹体を構成する全繊維細胞についての勾配を $G(y, r)$ として記述することができる。

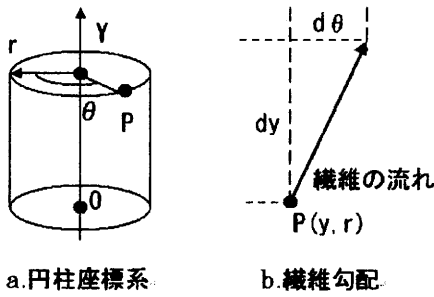


図4. 繊維の内部勾配を表現する座標系

#### 4. 木材表面の繊維勾配測定方法

##### 4.1 繊維勾配の測定原理

本研究における、木材表面の繊維勾配分布測定のための撮影環境を図5に示す。カメラCを木材表面に正対するように設置し、単一の光源Lを木材の繊維走行方向に移動しながら複数の像を撮影する。カメラの位置、および光源の軌跡は同一座標系で記述され、また被写体である木材自身も、撮影像上の画素位置から共通の座標系での座標値が求められるように全体座標系を定義しておく。

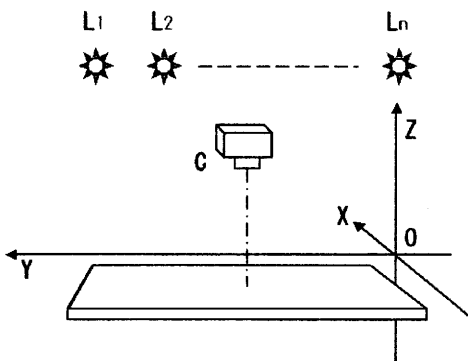


図5. 撮影環境

いま、木材表面上の繊維勾配 $\beta$ を図6のように定義する。微小鏡面群が勾配 $\beta$ で配置されていると考えることにより、Phongの鏡面反射モデルを適用すると、鏡面反射の法線は木材表面の法線Nから角度 $\beta$ だけ傾いた $N'$ とみなすことにより、その

法線を介して光源の正反射と視点が重なるときに最大の反射率を示す。

木材面のある一点に着目し、照明角度の変化による画素の輝度値変化を考えると、図7に示したように照明角度に対して単調増加した後に単調減少する。輝度のピークを示した時の入射角度 $\alpha_{max}$ に対する正反射方向が視点方向に一致する。光源位置、着目点の座標、視点の座標は全体座標系で表現できるため、図6に示した関係によりその点における繊維勾配 $\beta(x,y)$ を特定することができる。

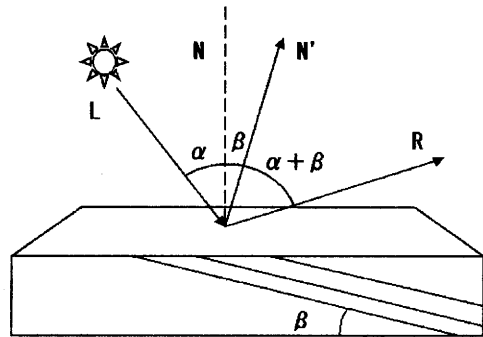


図6. 木材表面での鏡面反射

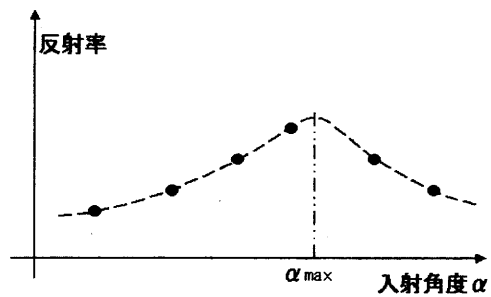


図7. 入射角度と反射率の関係

##### 4.2 スプライン補間による撮影数の低減

光源位置の変化を利用して勾配を求める方式では、求める勾配の精度は撮影枚数(=光源位置数)に依存することとなる。小数の撮影枚数より精度良く潜り角分布を求めるためには、少数の光源位置により得た撮影像よりスプライン補間などによって連続的な照射角度の変化に対する画素値を得るようにする。本研究の実験では8方向の照明により撮

影を行い、その間の値については十分に小さなステップの補間値を用いて  $\alpha_{max}$  を求めた。

#### 4.3 照明強度の不均一性除去

上述した手法では反射率を根拠に勾配を特定するため、画素値から反射率を求めるためには入射光量が一定である必要がある。現実には、異なる位置からの照明により光量は異なり、また同じ撮影像の木材上内でも位置により光量が異なる。

本研究では、あらかじめ設定してある各光源に対して、白板の撮影像を用意しておく。白板は十分に拡散するものを用い、これを各位置における各光源に対する完全拡散反射と仮定することにより、撮影像間の各位置に入射する相対的な光量がわかる。光源の位置と絶対光量をコントロールすることなく、拡散面からの反射を利用して補正した反射率を用いることにより、適正な計測を行なう。

### 5. 抽出結果とマッピング結果

本研究では木材（波状木理の強いシカモア；カエデの一種）の柁目面に対して、横 100mm × 縦 200mm の範囲をデジタルカメラで横 200 画素 × 縦 400 画素になるようにカメラ位置を調整し、8 方向の光源を 1 灯ずつ点灯して計 8 枚の画像を撮影した。図 8 に撮影像の例を示す。左の画像は木材に対して斜め上方から、中央の画像は木材のほぼ正面から、右の画像は木材に対して斜め下方から照明を照射して撮影した。

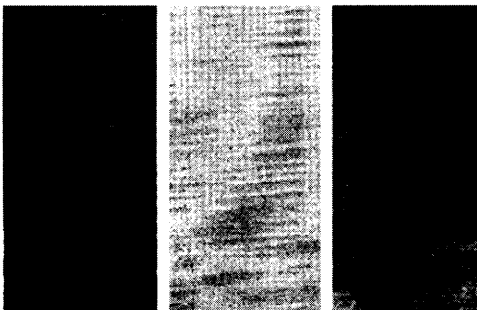


図 8. 撮影像の例

左の画像と右の画像を比較すると、光源の照射方向の変化によりもくの発現が逆になっていることが確認できる。また正面からの光の照射により全体に明るく発光する傾向が見られ、統計的には木材表面に平行に繊維が走行する（平均的な勾配は 0 に近い）ことがわかる。

前章で記した手法を用いて木材表面の繊維勾配分布を測定した結果を図 9 に示す。この例では木材表面に勾配がおおよそ  $-0.247 \sim +0.201$  の範囲で測定され、図 9 ではその勾配分布を 0 ~ 255 の画素値に置き換えて表示している。

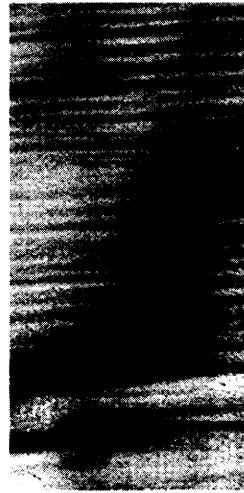


図 9. 繊維勾配の抽出例

計測された繊維勾配分布を、3 章で示した木理のモデルに  $G(y,x)$  として適用し、手続的な手法で生成した年輪パターンとともにレンダリングした例を図 10 に示す。計測された繊維勾配は柁目面における分布であるので、この分布を樹木の  $ry$  面にマッピングし、 $\theta$  方向に対しては勾配は変化せず一定とした。

左の画像は柁目面で切断した表面をレンダリングした例であり、図 8 に示した撮影像に似た形でもくが発現している。右の画像は板目面で僅かな傾斜をつけて切断した表面をレンダリングした例であり、木理による繊維勾配は髓に相当する中央部を

挟んで位相が逆転することになり、左右でもくの明暗が逆転して発現している。

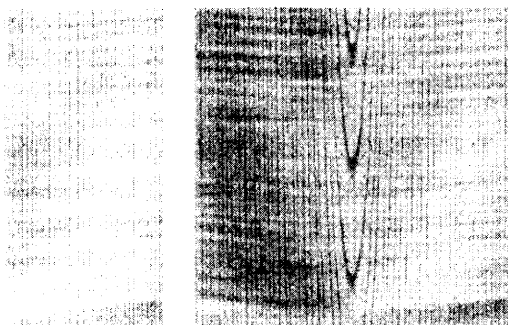


図 10.レンダリング例

## 6. まとめ

本研究では樹木内部に存在する不均一な繊維勾配を、実物の木材よりキャプチャーし、それを3次元幾何モデルに取り込むことによりリアルな木目画像を容易に生成することが可能であることを示した。

今後の課題として繊維勾配分布抽出のための撮影の簡易化があげられる。スプライン補間の性質上、サンプルの光源が少なくなると精度の低下が懸念されるが、光源を連続的に変化させた動画像を解析するなどの工夫も考えられる。

また今回対象とした繊維勾配分布のほか、年輪による色の変化や導管と呼ばれる管状の要素など、他にも実物のサンプルから情報をキャプチャーして3次元モデルへ適用する対象が考えられる。

将来的には多くのサンプルからの各属性データを蓄積することで、DBすることで、リアルな木目の表現では重要となる樹種特定のためのパラメータ体系を構築したり、より柔軟なテクスチャ表現や樹種を折衷した新しい風合いのテクスチャ表現、さらには樹種による傾向を定量化することで林産学分野での応用も可能になると考えられる。

## 参考文献

- [1] Peachey, D.R.: Solid Texturing of Complex Surface, Proc. SIGGRAPH '85, pp.279-286 (1985).
- [2] 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)
- [3] 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)
- [4] 河合直樹: 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, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.3, pp.586-593 (2000)
- [5] 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).
- [6] 島地謙ほか: 木材の構造, 文永堂出版 (1985)