

曲線骨格モデルによる3次元連続かつ滑らかな 木目ソリッドテクスチャの実現

桃井 貞美^{1,2,a)} 高寺 政行³

受付日 2014年1月14日, 採録日 2014年6月17日

概要: CG を用いて木材の質感を表現する方法として, 樹木の骨格モデルを用いたソリッドテクスチャリングにより年輪パターンを生成する手法が提案されている. この方法は, 樹の枝分かれによる年輪パターンの変化や節の表現が可能であるという優れた長所を持っているが, 次の2つの問題点があった. 第1に, 骨格が直線で表現されているため骨格付近の領域で滑らかさに欠ける直線的なパターンが生成されてしまう. 第2に, 骨格ノードの接続領域で3次元的に不連続な年輪パターンが生じてしまう. 本論文では, 骨格を曲線で表現することにより, 前述の問題点を解決する手法について報告する. この手法では, 従来の手法と同様の骨格ノード群から滑らかに連続な曲線骨格を自動的に生成し, 高さ方向にコントロールポイントの位置を最適化することにより, 曲線のパラメータと高さ方向の座標値を線形変換可能な状態にし, 高速に骨格上の対応点を求めることができる. これにより, これまでよりも3次元空間で完全に連続かつ滑らかな年輪パターンを生成することができ, 処理時間も短縮することができた.

キーワード: 画像生成, CG, ソリッドテクスチャ, 木目模様

Implementation of Three-dimensional Continuity and Smoothness on Wood Grain Texturing by Using Free-form Curve Framework Model

SADAYOSHI MOMOI^{1,2,a)} MASAYUKI TAKATERA³

Received: January 14, 2014, Accepted: June 17, 2014

Abstract: In CG, a solid texturing technique by which can express realistic wood grain texture using the Tree Framework Model was proposed previously. This method is able to express variations of annual ring pattern and knot pattern. Still, also has following two issues. The first issue is that as nearer position places from framework as annual ring pattern becomes less smooth and straight pattern. The second issue is 3 dimensional discontinuity of annual ring around the center of two nodes. In this paper, a method by which can solve these issues by using framework constructed with free-form curves is reported. In this method, a framework of smoothly continued curves will be created automatically from set of node points. Then coordinate of each control point will be revise into most suitable value, so that parameter value of a free-formed curve can linearly calculated from z-value at a target point. With this technique, not only it being possible to generate smooth annual ring pattern with complete continuation in a 3 dimensional space, but also processing time could be saved.

Keywords: image synthesis, CG, solid texture, wood grain

¹ 長野県工科短期大学校
Nagano Prefectural Institute of Technology, Ueda, Nagano
386–1211, Japan

² 信州大学大学院総合工学系研究科
Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology
Shinshu University, Ueda, Nagano 386–8567, Japan

³ 信州大学先鋭領域融合研究群国際ファイバー工学研究所
Institute for Fiber Engineering (IFES), Interdisciplinary
Cluster for Cutting Edge Research (ICCER), Shinshu Uni-
versity, Ueda, Nagano 386–8567, Japan

1. はじめに

近年, 工業製品のデザインにおいて, CG (コンピュータグラフィックス) は不可欠な技術となっている. 木材など自然物を材料とする製品においても, CG は一般的に用いられるようになってきた. その過程で自然物の複雑なテ

a) momoi@pit-nagano.ac.jp

クスチャを表現するための技術開発も活発に行われてきた [1], [2], [3].

無機質な素材に比べ、木材は人間に癒しを与える素材と考えられており、その心理効果を計測する研究も多数行われている [4]. 建築物や家具などのデザインシミュレーションを行うためには、様々な樹種の多様なテクスチャを効率良く生成する機能がCGシステムに求められる。

CGを用いて木材製品のシミュレーションを行う際には、これまで大きく分けて2つの手法が用いられてきた。1つ目の方法は、実写の木目画像をマッピングする手法 [5] で、2つ目の方法は、ソリッドテクスチャリングにより算術的にテクスチャを合成する手法 [6] である。前者は実物の写真を用いるため、リアリティの高いテクスチャが得られるものの、複雑な形状との3次元的な整合性がないため、自由曲面などへの適用では、不自然なテクスチャとなってしまう。また後者は空間内に仮想的な年輪状の色変化を数式で定義して、そこから形状表面を切り出すことにより模様を生成するため、自由曲面などの3次元形状と年輪形状の整合性が保たれるものの、数式により合成する木目そのもののリアリティが実写のものに比べると劣っているという短所を持っていた。

桃井は、樹木の骨格を直線セグメントで定義し、樹木内部の年輪の形成を成長モデルによりシミュレーションする手法を提案した [7]. この手法は、ソリッドテクスチャリングに分類される手法で、幹や枝の骨格軸を変化させることにより、多様な年輪パターンが生成できることを示した。

桃井は、さらに年輪間の色のパターンとして自然の樹木からサンプリングしたカラーパターンを取り込むことにより、樹種ごとに異なる木目模様をリアルに表現する手法を提案した [8]. この手法は、ソリッドテクスチャリングにマッピング的な技法を組み合わせ、双方の長所を活かすことにより、リアリティの向上を図った手法といえる（以下、この2つの手法をまとめて「直線骨格モデル法」と呼ぶ）。

しかし、桃井の手法には2つの大きな問題点があることが実験で明らかになった。1つ目の問題点は、骨格軸を構成するノード間の中央を通る平面上で、ある条件のときに年輪模様が不連続となるエリアが発生することである。2つ目の問題点は、樹木の骨格を構成するノード間が直線で補間されているために、骨格軸に近いエリアの年輪形状が直線的になってしまうことである。いずれの問題点も、デザインシミュレーションに活用する際には、大きな障害となってしまう。これを解決することができれば、直線骨格モデル法の実用性をさらに高めることができると考えられる。

本論文では、従来の直線骨格モデル法の上記の2つの問題点を解決する手段として、骨格軸を曲線化する手法を提案する。また、骨格軸のコントロールポイントを最適化する

ることにより、従来よりも高速な処理が可能となったことを示す。

2. 直線骨格モデル法

2.1 CGによる木目模様表現手法の比較

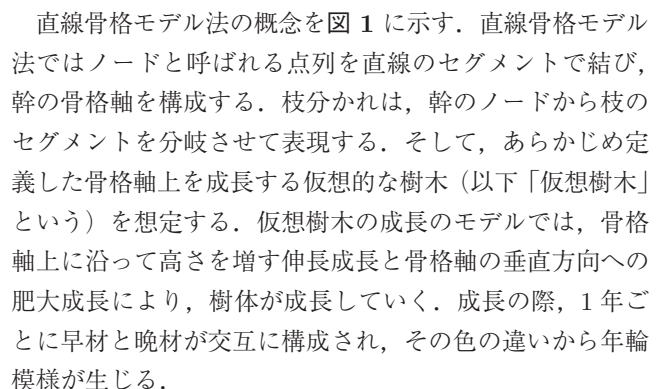
CGにおける木目模様の表現技術は、これまでに様々な手法が提案されている。

樹木の概形を点群によって定義し、ポテンシャルの等値面に年輪を形成する手法 [9] は、無数の点電荷とのポテンシャル計算を要し実用的ではない。この方法を応用した木目柄のデザインシステム [10] は、印刷物の作成が目的で、複雑な骨格には対応していない。木口面の画像を投影マッピングする手法 [11] は、針葉樹材の表現を得意とするが、枝分かれを表現できない。部分的なソリッドテクスチャのパッチを方向場に沿って繰り返ラッピングする手法 [12] は、木材内部と樹皮を同時に表示できるが、基本ソリッドを作成するのが容易ではない。樹木のマイクロな組織の表現手法が報告されている [13], [14] が、これらは木材の微細な組織構造によって生じる異方性反射の表現を目的としたもので、骨格構造による年輪パターンの変化を対象としていない。

直線骨格モデル法の長所は、骨格形状を多様に変化させることにより、幹の曲がりや枝の部分の年輪パターンの変化、節の発生などをシミュレーションできることである。また、様々な実物サンプルから非破壊でカラーパターンをサンプリングすることにより、樹種の特徴表現ができるだけでなく、塗装面や特殊加工した材料もリアルに表現できる点も優れている。ソリッドテクスチャリングの特徴である自由な切り口での木目模様の生成機能により、実写画像の入手が難しい長尺物や貴重な材料のシミュレーションも可能である。節の表現機能や切り出し位置の微調整機能が、建築物で最近多く用いられる間伐材などの板材のシミュレーションに適している。

2.2 直線骨格モデル法の概要

直線骨格モデル法の問題点を明らかにするため、まずこの手法の概要について触れる。

直線骨格モデル法を  に示す。直線骨格モデル法ではノードと呼ばれる点列を直線のセグメントで結び、幹の骨格軸を構成する。枝分かれは、幹のノードから枝のセグメントを分岐させて表現する。そして、あらかじめ定義した骨格軸上を成長する仮想的な樹木（以下「仮想樹木」という）を想定する。仮想樹木の成長のモデルでは、骨格軸上に沿って高さを増す伸長成長と骨格軸の垂直方向への肥大成長により、樹体が成長していく。成長の際、1年ごとに早材と晩材が交互に構成され、その色の違いから年輪模様が生じる。

この仮想樹木の樹体内をテクスチャ空間として考え、任

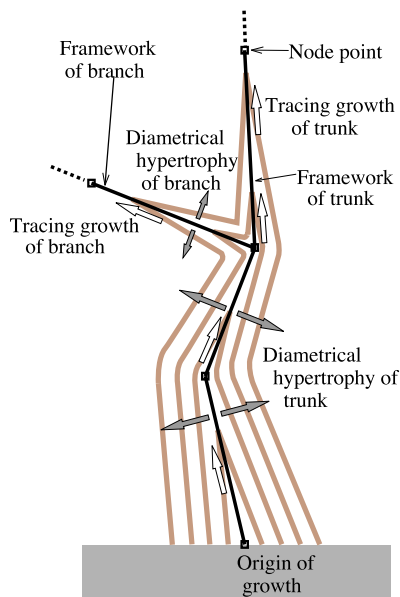


図 1 直線骨格モデル法

Fig. 1 Straight framework tree model method.

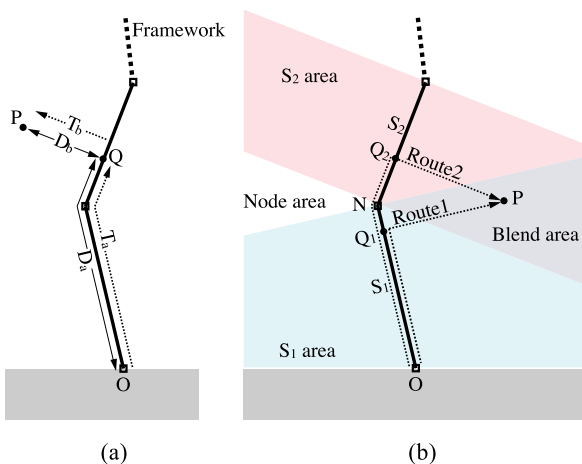


図 2 直線骨格モデル法の成長経過時間計算

Fig. 2 Growth elapsed time calculation with previous method.

意の形状の部品を切り出すように、テクスチャを生成することができる。テクスチャ空間内にある任意の点の色は、座標値をもとに一意に求めることができる。仮想樹木の成長表面がこの点に達するまでに要した時間（以下「成長経過時間」と呼ぶ）を求め、早材から晩材への変化の周期への対応付けにより、その点の色を決定する。

直線骨格モデル法での成長経過時間の求め方を図 2(a) に示す。任意の点 P について、骨格軸上の最短距離の点 Q を求め、成長原点 O から発生した成長点が骨格軸に沿って Q まで達するのに要した伸長成長経過時間 T_a と、Q から P まで樹体が肥大するのに要した肥大成長経過時間 T_b との合計が成長経過時間 T となる。ここで、伸長成長および肥大成長の距離を D_a , D_b , 伸長成長および肥大成長の速度を v_a , v_b とすると、 T_a , T_b , T はそれぞれ次式で表される。

$$T_a = \frac{D_a}{v_a} \tag{1}$$

$$T_b = \frac{D_b}{v_b} \tag{2}$$

$$T = T_a + T_b \tag{3}$$

図 2(b) に示すように、セグメントを円柱状に拡大したエリアをそのセグメントの影響エリアと考える。2つのセグメントの影響エリアが重なる領域は、年輪を滑らかに接続するためのブレンドエリアとなる。ブレンドエリアでは、影響する2つのセグメントを経由した成長経過時間を求め、ブレンド関数によりブレンドされた成長経過時間を求める。このブレンド処理により、セグメント間の年輪が滑らかに接続される。

どちらの影響エリアにも属さないエリアは一番近いノードを経由する経路で成長経過時間を求める。付近に枝がある場合には、幹のみを経由した経路と幹から枝を経由した経路の成長経過時間をブレンドする [7] ことにより統合的な成長経過時間を求める。

2.3 直線骨格モデル法の問題点

問題となる不連続な年輪パターンが発生するケースは幹の年輪パターンの滑らかさを確保するためのブレンド処理に起因している。

前述のとおり、直線骨格モデル法では、連なるセグメント S_1 , S_2 の傾きが異なるときは、2つのセグメントの影響範囲が重なるエリアについて、年輪が滑らかにつながるよう、 S_1 を経由した成長経過時間と S_2 を経由した成長経過時間をブレンド処理する。多数のセグメントに対し、これを効率的に行うために、まず任意の点と骨格の各ノードとの距離を求め、最短距離のノードを決定する。このノードの両側のセグメントを経由した経路について、ブレンド処理を行う。

図 3 に不連続な年輪パターンが発生するケースを示す。ブレンド処理では、最も近いノードを起点に両側の2つのセグメントのみを距離計算の対象としている。そのため、セグメント S_2 の垂直二等分面 M_2 がブレンドエリアと交差する面上で対象ノードが切り替わるため、成長経過時間が急激に変化することになり、模様が一時的に不連続になってしまう。2つのブレンドエリアが重なる場合も同様のことが起こる。よって、ターゲットとなる形状の切り出し位置は、骨格軸から遠い場所は避けなければならない、利用者には大きな制約になってしまう。

もう1つの問題点は、骨格軸に近づくほどブレンドエリアが狭くなるので、結果として角張ったような年輪模様になってしまうことである。その状況は、図 3 から確認できる。これを避けるためには、骨格軸付近を避けるか、骨格軸を短いセグメントで滑らかに接続することが必要である。

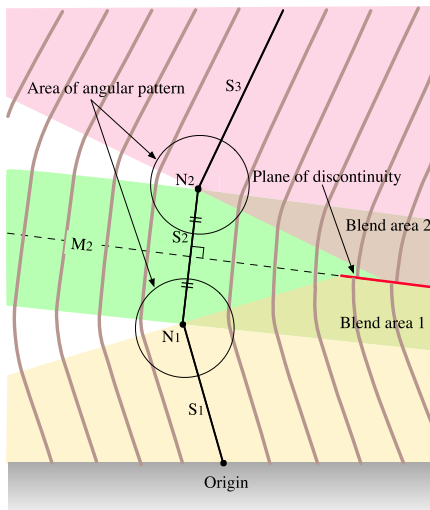


図 3 不連続なテクスチャの発生原因

Fig. 3 Cause of occurring discontinuous texture.

この2つの問題点は、相反的に影響し合っている。滑らかな骨格にするために骨格軸を細分割することは、不連続面の発生エリアを骨格軸に近いエリアに拡大してしまうからである。そのため、この2つの問題点を運用上のテクニックにより、同時に回避することはむずかしい。これでは、骨格軸を自由に定義することにより、多様な年輪パターンを合成できるという当該手法の長所が生かされず、直線性の高い針葉樹を対象とした用途でのみの活用にとどまってしまう。

針葉樹材から広葉樹材まで、幅広い樹種に対応した自由度の高い木目テクスチャ合成を可能にするため、この2つの問題点を根本的に解決するような手法の確立が求められている。

3. 自由曲線を用いた骨格モデル

直線骨格モデル法の2つの問題点を解決する手段として、本論文では骨格形状の自由曲線化とそれともなう伸長成長経過時間の計算方法の改良を提案する。

直線骨格モデル法では、 $x-y$ 平面を地上面と考え、高さ方向を z 軸方向としている [7]。本法においても同様の座標系を用いる。

骨格に用いる自由曲線には、Bézier 曲線を用いた。その理由は、骨格軸をユーザがマニュアル操作で自由に変形するような用途が想定されることから、形状を操作しやすい Bézier 曲線が適していると考えられることにある。また後述の最適化処理により z 座標とパラメータが線形変換でき、交点計算が容易であることも理由の1つである。

本法では、骨格軸が z 正方向のみに成長することならびに傾斜角度が大きくならないという性質を利用して、各ノードにおける C^1 連続性（接線連続性）を保ちながら骨格軸となる Bézier 曲線のパラメータ t と z 座標値が比例関係となるよう制御点の位置を最適化した曲線骨格軸を自動

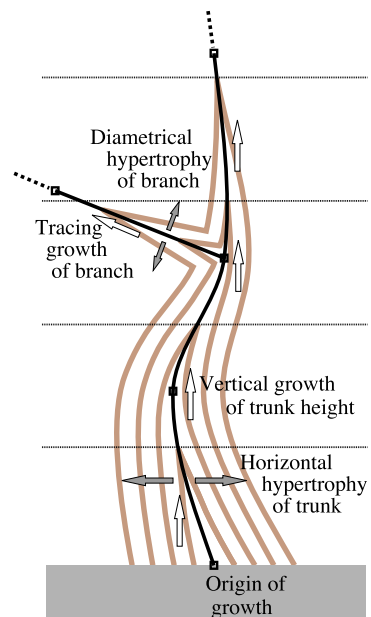


図 4 曲線骨格を用いた樹木の成長モデル

Fig. 4 Tree growth model with free-form curve framework.

生成する。また、成長経路の骨格上の対応点の位置を最短距離によってではなく、水平方向の交点により求めることでセグメント間のブレンド処理が必要なくなり、3次元的に完全に連続な年輪パターンを実現する。以下にその具体的な方法を述べる。

3.1 本法の前提条件

自然の樹木の幹は、木材として活用される部分について、その使用目的上、直線性が高い。樹木の成長モデルに基づく仮想樹木も、その性質に沿った前提条件をつけることは実用上問題ないと考えられる。仮想樹木は、 $x-y$ 平面に対し垂直方向、つまり z 軸方向を基準に幹が成長し、幹の向きが z 値で逆方向に向かうことはなく、骨格線分はおおむね z 軸に沿って定義される。そのため、幹に沿った伸長成長の経過時間は、 z 座標値と比例関係にあるものとして扱っても大きな問題はないと考えられる。また同じ理由で、幹の肥大成長の成長方向を水平方向と考えることができる。そこで本法では、仮想樹木の成長のモデルを改良し、簡易化して、次のように考えることにする。

改良された成長モデルに基づく仮想樹木の幹は、曲線骨格に沿って高さが均等な早さで伸長成長し、水平方向に肥大成長するものとする（図 4 を参照）。

また、骨格曲線の滑らかさは、樹木の不規則性を考慮すれば、 C^1 連続程度で十分であると考えられる。よって改良法では、骨格曲線の連続性が最低限 C^1 連続となるよう配慮する。

枝については、直線骨格モデルの考え方を踏襲し、枝の直線骨格軸に沿って伸長成長し、骨格軸と垂直方向に肥大成長するものとする。

このような成長モデルを用いることにより、直線骨格モデルで必要だった幹ノード周辺での成長経過時間のブレンド処理が不要になり、これによりテクスチャ計算の高速化が期待できる。

3.2 骨格ノードを通る自由曲線の決定

直線骨格モデル法の骨格データは、骨格軸を構成するセグメントの連結部となるノード点群の座標値により定義される (図 5 (a) 参照)。曲線骨格モデル法では、直線骨格モデル法の基本的なこの座標値データをそのまま活用するために、このノードを通る自由曲線を自動生成し用いることにする (図 5 (b) 参照)。

任意のノード点群を通過し、滑らかに連続な Bézier 曲線は次の式 (4) により求めることができる [15]。

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{12}(7C_0 + 6C_3 + C_6) \\ C_2 &= \frac{1}{6}(C_0 + 6C_3 - C_6) \\ C_4 &= \frac{1}{6}(-C_0 + 6C_3 + C_6) \\ C_5 &= \frac{1}{12}(-C_0 + 6C_3 + 7C_6) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

この方法により求めた Bézier 曲線は、 C^2 連続性を有している。

3.3 成長モデルの改良

Bézier 曲線を用いた曲線骨格モデルにおいては、肥大成長時間を求めるために骨格軸とテクスチャ空間内の任意の点 P との物理的距離を求める必要がある。これまでの直線骨格モデル法と同様に骨格軸と垂直方向に肥大成長すると考えた場合、点 P と最も近い Bézier 曲線上の位置を特定するためには、対応するパラメータ t の値を求める必要があるが、パラメトリック表現された式を用いて t の値を直接

求めることは困難である。このような場合は通常、Bézier 曲線を再分割しながら指定された条件に近づけていく必要がある。Bézier 曲線の分割には、de Casteljau のアルゴリズムが用いられる [16]。この処理は計算が複雑で時間がかかるうえ、分割時に許容範囲内の誤差を含んでいるため、再帰的な計算により誤差が蓄積されていく可能性がある。

上記の問題に加え、曲線の接ベクトルの垂直面は曲線から離れた場所で z 座標の上下が逆転するので、最短距離の位置が一意に決定できず、年輪が不連続となる恐れがある。

この2つの問題を回避するため、これまでの直線骨格モデル法では、伸長成長は骨格軸上を等速で進み、肥大成長は骨格軸と垂直な方向に進むと考えていた点を、新しい曲線骨格モデル法では、伸長成長は z 軸方向に一定速度で進み、肥大成長は z 値が一定な水平方向に進むものとする。この方法を用いた場合においてもやはり、座標値から逆にパラメータ t を求めることは、再帰的な計算が必要になる。

そこで、 z 座標値からパラメータ t へ線形変換できるよう、骨格軸を構成する Bézier 曲線を最適化する方法を考案した。

3.4 骨格曲線の最適化

Bézier 曲線の両端点の間を三等分する位置にコントロールポイントを順に配置すると、Bézier 曲線は直線に縮退し、この際、パラメータ t と t における曲線上の点は完全に直線関係となることが知られている [17]。この性質は、各座標軸ごと独立に成立するので、 z 座標に関し両端点を三等分するようにコントロールポイントを配置することにより、 z 座標値とパラメータ t を直線関係とすることができると予測される。このことは以下のように確認することができる。

図 6 のようなテクスチャ空間内の任意の点 P_t の色を決めたいとき、 P_t と同じ高さの骨格曲線上の点 Q_t との距離を求めなければならない。 Q_t の座標値は、パラメータ t から計算できるが、この t を直接求めることはできない。そこで、パラメータ t が容易に求められるよう骨格曲線を最適化する処理をあらかじめ行うことにした。

今骨格がノード群 $N_0, N_1, N_2 \dots$ で定義されているとき、任意の点 P_t が骨格曲線のセグメント S_0 の両端点のノード N_0, N_1 の中間の高さにあるとする。 S_0 のコントロールポイントを C_0, C_1, C_2, C_3 、各コントロールポイントの間を $t:(1-t)$ の比率で分割した点を C_{10}, C_{11}, C_{12} 、これらの間をさらに $t:(1-t)$ に分割した点を C_{20}, C_{21} とすると、 Q_t は C_{20}, C_{21} 間を $t:(1-t)$ に分割した点となる。点 $P_0 \sim P_{21}$ は、点 $C_0 \sim C_{21}$ と z 座標値が同じで P_t と x, y 座標が等しい点群とする。

P_t と同じ z 値の点 Q_t を求めたいとき、 P_0 と P_t の距離は、Bézier 曲線の性質から次の式で表すことができる。

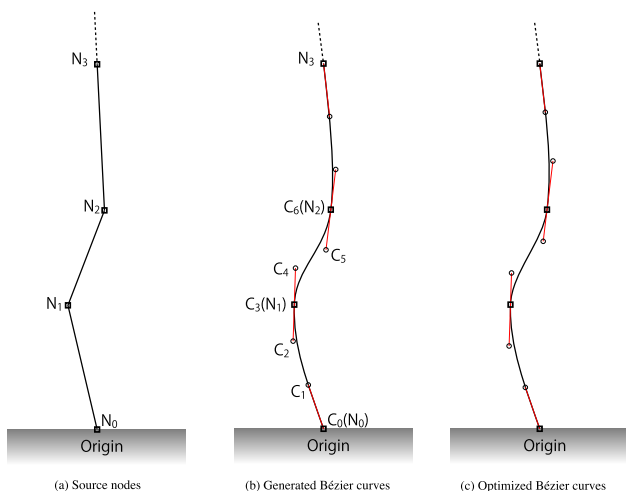


図 5 ノード点群からの骨格曲線の自動生成と最適化

Fig. 5 Automatic generation and optimization of skeletal curves from node points.

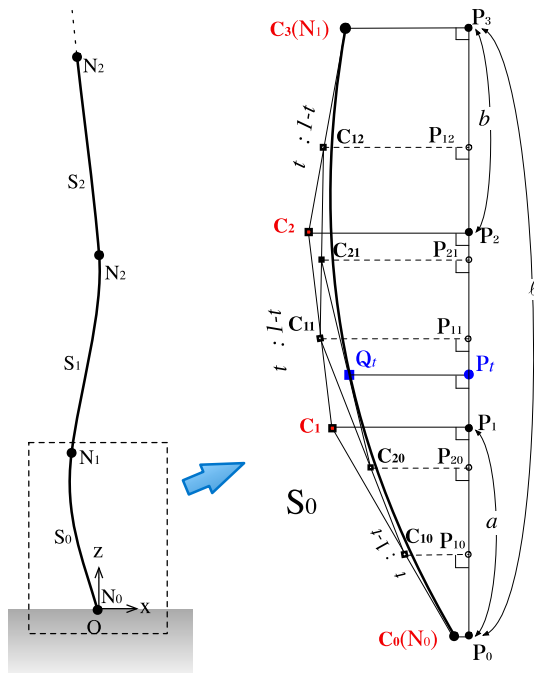


図 6 骨格曲線の最適化

Fig. 6 Optimization of skeletal free-form curve.

$$|\overrightarrow{P_0P_t}| = (-2\ell + 3a + 3b)t^3 + (3\ell - 6a - 3b)t^2 + 3at \quad (5)$$

ただし、 a : 点 P_1 , P_0 の距離、 b : 点 P_2 , P_3 の距離、 ℓ : 点 P_0 , P_3 の距離を表している。

ここで、

$$a = b = \frac{\ell}{3} \quad (6)$$

とすると、式 (5) は、

$$|\overrightarrow{P_0P_t}| = \ell t \quad (7)$$

$$t = \frac{|\overrightarrow{P_0P_t}|}{\ell} \quad (8)$$

となる。この式の中で、 P_0 , P_t の距離は、 C_0 と P_t の z 座標値から容易に求めることができる。

この式 (6), (8) より、 a , b が ℓ の長さの 3 分の 1 になるようにコントロールポイントの位置を調整すれば、パラメータ t の値が z 座標値の差から線形変換により容易に求められるようになることが分かる。

そこで、骨格曲線の各セグメントの 4 つのコントロールポイントの z 座標が等間隔となる位置に中間のコントロールポイントを移動させる。移動の方向は、端点での接線方向とする。この最適化処理により、骨格曲線のなめらかさは、 C^2 連続から C^1 連続に劣化する。しかし、セグメントの長さを極端に変化させない限り、骨格曲線の見かけ上の滑らかさは、ほとんど変化しない。

実際にこの方法で、図 5 (b) の曲線のコントロールポイントの位置を最適化した例を図 5 (c) に示す。元の曲線 (b) と最適化された曲線 (c) では大まかな印象に変わりがなく確認できる。

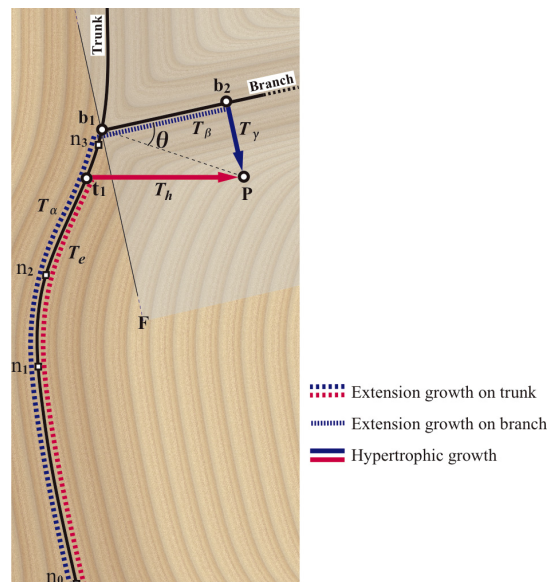


図 7 枝がある場合の 2 つの成長経過時間のブレンド

Fig. 7 Blending of two growth routes when branches exist.

3.5 成長経過時間の計算

こうして求めたパラメータ t の値から、骨格軸上の Q_t の座標値は、次の式で求めることができる。

$$Q_t = t^3 C_3 + t^2(1-t)C_2 + t(1-t)^2 C_1 + (1-t)^2 C_0 \quad (9)$$

したがって、水平方向の物理的な距離 d と曲線骨格モデルの肥大成長経過時間 T_h は、次式で求めることができる。

$$d = \sqrt{(x_p - x_Q)^2 + (y_p - y_Q)^2} \quad (10)$$

$$T_h = \frac{d}{v_h} \quad (11)$$

ここで、 d : 点 P_t と点 Q_t の距離、 (x_p, y_p) : 点 P_t の座標値、 (x_Q, y_Q) : 点 Q_t の座標値、 v_h : 肥大成長速度、 T_h : 曲線骨格モデル法での肥大成長経過時間を表す。

伸長成長に要する時間 T_e は、 z 座標値と伸長成長速度 v_e から次式により求めることができる。

$$T_e = \frac{z}{v_e} \quad (12)$$

点 P_t におけるトータルの成長経過時間 T は、伸長成長に要した時間と肥大成長に要した時間の合計により求める。

$$T = T_e + T_h \quad (13)$$

3.6 枝の周辺での処理方法

枝の周辺では、幹だけを経由した成長経過時間 T_1 と幹から枝を経由した成長経過時間 T_2 を求め、2 つの成長経過時間をブレンドして年輪が滑らかにつながるよう処理を行う。図 7 にそのブレンド方法を示す。曲線骨格モデルでは、枝の始点を幹の骨格上に配置する。枝の始点 b_1 が幹と接しているとき、 b_1 を通り枝に垂直な平面 F を境に枝が伸びていく側の空間をこの枝の影響範囲とする。

空間内の任意の点 P について、幹だけを經由した成長経過時間を求めるためには、 P から水平に幹の骨格上へ線を伸ばした交点を t_1 とし、成長原点から幹の骨格上を t_1 まで伸長成長するのに要する時間 T_e と、 t_1 から P まで肥大成長するのに要する時間 T_h の合計を、 T_1 とする。

また、幹から枝を經由して P に至る成長経路については、 P から枝に垂直に下ろした交点を b_2 として、成長原点から b_1 まで幹が伸長成長するのに要する時間 T_α 、 b_1 から b_2 まで枝が伸長成長するのに要する時間 T_β 、および b_2 から P まで枝が肥大成長するのに要する時間 T_γ の合計により T_2 を求める。このうち、 T_α は T_e と同様に求めることができる。また T_β は次式により求める。

$$T_\beta = \frac{|\overline{b_1 b_2}|}{v_e} \tag{14}$$

ここで $|\overline{b_1 b_2}|$ は b_1 から b_2 までの距離を表している。伸長成長速度 v_e は、幹と共通の値である。次に T_γ は、単純に枝からの距離を肥大成長速度で割って成長経過時間を求めると、境界面 F を境に年輪が不連続になってしまう。これは、ブレンド処理を行う領域と行わない領域が境界面 F で接しているためである。そのため、 F の付近では枝の影響が滑らかに減少するように、 T_γ を徐々に無限大に近づける必要がある。そこで T_γ は次式により求める。

$$\left. \begin{aligned} T_\gamma &= \left(\frac{1}{\cos \theta} \right) \frac{|\overline{b_2 P}|}{v_b} & \left(\theta \neq \frac{\pi}{2} \right) \\ T_\gamma &= \infty & \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \tag{15}$$

ここで、 θ は枝と線分 $\overline{b_2 P}$ がなす角度、 $|\overline{b_2 P}|$ は b_2 から P までの距離、 v_b は枝の肥大成長速度を表す。

したがって T_1 と T_2 は、次の式 (16), (17) により求める。

$$T_1 = T_e + T_h \tag{16}$$

$$T_2 = T_\alpha + T_\beta + T_\gamma \tag{17}$$

ここで T_1, T_2 のうち小さい値を成長経過時間として採用すれば、年輪は連続となるが、境界部分では鋭角に接続されてしまう。そこで枝の付近の年輪を連続かつ滑らかに接続するために、次式でブレンドする。

$$T = \frac{T_1 \cdot T_2}{\sqrt{T_1^2 + T_2^2}} \tag{18}$$

この式により T は、 T_1 が T_2 よりも大きくなるにつれて T_2 に近づき、 T_2 が T_1 よりも大きくなるにつれて T_1 に近づく。また $T_1 = T_2$ のときに、 $(1/\sqrt{2}) T_1$ となる。

4. 実装システムの概要

4.1 システム概要

曲線骨格モデル法を実装した「Wood Grain Texture Generator」システムの概要を図 8 に示す。テクスチャ生成のターゲットとなる自由曲面は、パラメータ u, v で表現

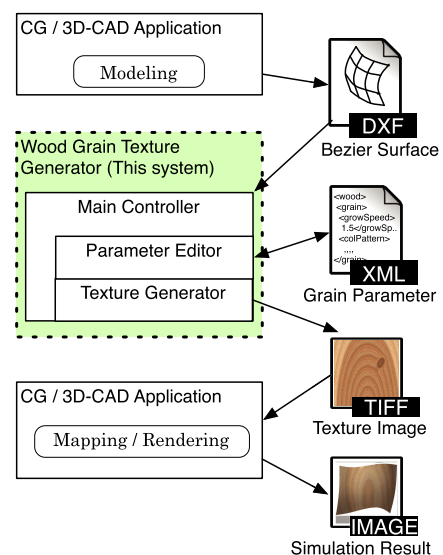


図 8 システムの概要

Fig. 8 Outline figure of this system.

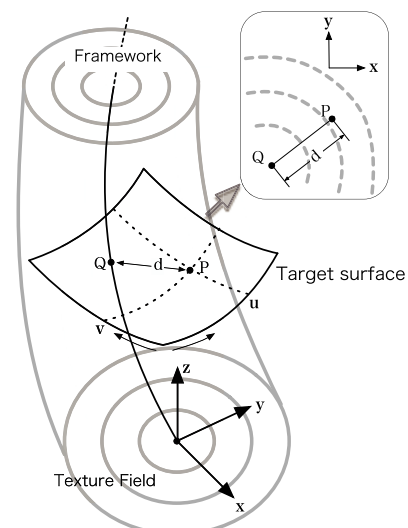


図 9 本システムでのテクスチャ空間概念

Fig. 9 Texture space concept of the system.

されたパラメトリック曲面で、外部の 3D-CAD や CG アプリケーションによりモデリングする。本システムでは、ターゲット自由曲面のデータファイルを読み込み、テクスチャ合成に用いる。合成したテクスチャを画像ファイルとして CG アプリケーションに転送し、ターゲット自由曲面にマッピングして、最終のレンダリングを行う。

本システムは、ターゲット曲面のテクスチャ空間内への位置合わせなどを行うパラメータエディタと実際に画像の合成処理を行うテクスチャジェネレータで構成されている。

4.2 システムの概念

図 9 に本システム内部でのテクスチャ合成の概念を示す。まず、ターゲット自由曲面をモデリングされたオブジェクト座標系からテクスチャ座標系の任意の位置に変換する。このターゲット自由曲面のパラメータ u, v を走査

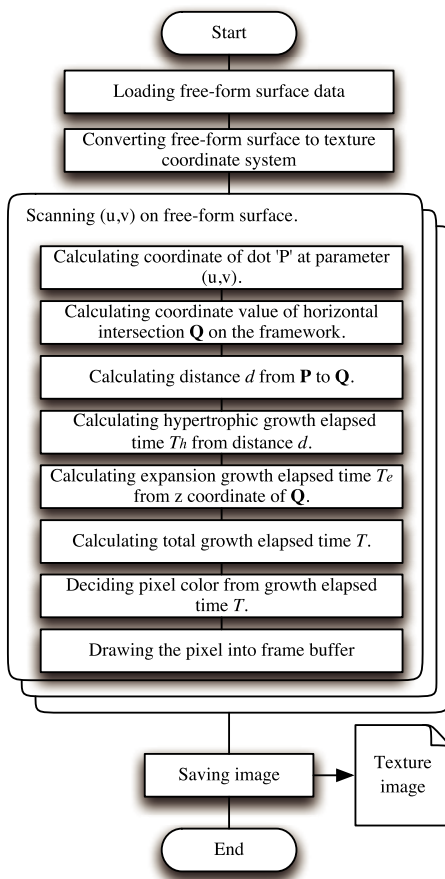


図 10 木目テクスチャ画像の生成手順
Fig. 10 Generation procedure of grain texture image.

して、 u, v に対応した曲面上の点 P の座標値を求める。 P から水平に骨格軸上への交点 Q を求め、 P と Q の距離 d を求める。 d から肥大成長に要した時間 T_h を求める。 また Q の z 座標値から伸長成長に要した時間 T_e を求める。 この T_h と T_e を合計し、成長経過時間 T を求める。 T をカラーパターンの要素番号へ対応づけることにより、色を決定する。

図 10 にテクスチャ合成の処理フローを示す。 まず、読み込まれたターゲット曲面を、設定されたテクスチャ座標系の位置へ変換する。 その後、ターゲット曲面のパラメータを目的の画素数で等分した間隔で走査し、1画素ずつ色を計算していく。

1 画素の色を計算する手順は、次のとおりである。

- (1) パラメータ u, v から点 P の座標値を求める。
- (2) 点 P の水平面と骨格軸の交点 Q を求める。
- (3) 点 Q と点 P の距離 d を求める。
- (4) 距離 d から肥大成長経過時間 T_h を求める。
- (5) 点 Q の z 座標値から伸長成長経過時間 T_e を求める。
- (6) T_h と T_e を合計し、成長経過時間 T を求める。
- (7) T からカラーパターンテーブルを参照し、色を決定する。

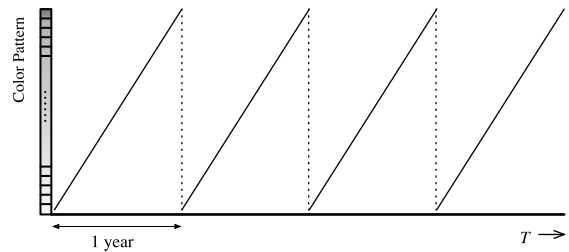


図 11 成長経過時間とカラーパターンの関係
Fig. 11 Relation between growth elapsed time and color pattern.

4.3 カラーパターンとの対応付け

成長経過時間と参照される年輪のカラーパターンの関係を図 11 に示す。 カラーパターンは、樹木の 1 年間の肥大成長による早材から晩材への色変化を自然の木材からサンプリングしたものである。 成長経過時間の 1 年周期でこのカラーパターンを繰り返し参照していく。 1 点ごとに、求めた色をフレームバッファの対応する画素に記録してゆき、すべての画素の処理が終了したら、画像をファイルに保存する。

本システムでは、ターゲット自由曲面のパラメータ u, v を均等に变化させてテクスチャ画像を合成するので、CG アプリケーションでのマッピングの際は、これと整合したマッピング方法を選択する。

5. 画像合成実験

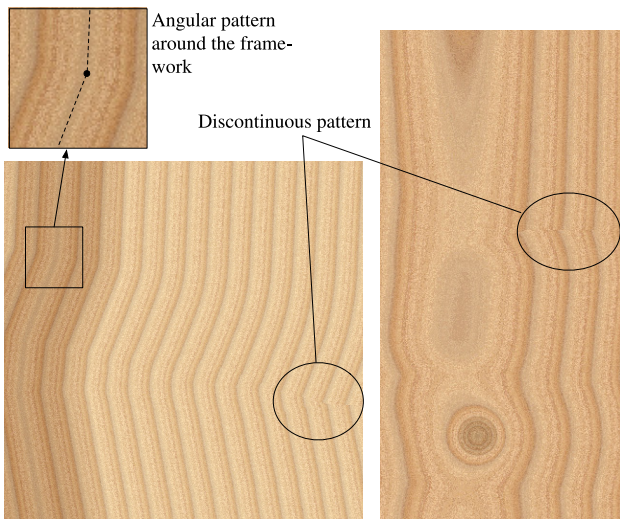
5.1 画像合成実験結果

本手法の効果を確認するため、従来の直線骨格モデル法とそれを改良した曲線骨格モデル法のそれぞれで、同じ骨格ノードを用いてテクスチャの合成を試みた。 図 12 にテクスチャの合成結果を示す。 ターゲット自由曲面は、平面を用いている。 効果を分かりやすくするため、不規則化処理は行っていない。

図 12(a), (b) が従来法により合成したテクスチャ画像である。 (a) の画像が骨格軸を通る垂直断面、(b) は板目面である。 従来法では、(a), (b) いずれの画像でも骨格軸から離れた場所で年輪パターンが不連続となっていることが確認できる(円内)。 また、骨格軸の付近で年輪に角張った形状が生じてしまい、滑らかさに欠けていることが分かる(四角内)。

図 12(c), (d) は提案法により合成したテクスチャ画像である。 従来法と異なり、非常に滑らかな曲線状の年輪形状であり、不連続だった場所も滑らかに表現されている。 本手法の目的である年輪形状の連続性と滑らかさの実現がいずれも実現されていることが確認できた。

図 13(a), (b) は、提案法により枝の周辺の柾目および板目のテクスチャを合成した例である。 この合成例から、枝周辺においても滑らかで連続なパターンが合成できていることが確認できる。



(a) Straight grain sample by previous method. (b) Cross grain sample by previous method.



(c) Straight grain sample by proposed method. (d) Cross grain sample by proposed method.

図 12 従来法と提案法による合成画像の比較

Fig. 12 Comparison of generated images with previous method and proposed method.

従来の方では、不連続なパターンの発生を避けるために、テクスチャの切り出し位置を不連続パターンが発生しない位置に調整する必要があったが、提案手法によりすべてのテクスチャ空間で模様³次元連続性が実現できた。これにより、まったく自由に切り出し位置を選択することができるようになった。

5.2 処理時間の計測

従来の直線骨格モデル法と提案の曲線骨格モデル法の処理時間を比較するため、同じ条件でテクスチャ画像を合成する実験を行った。ノード数の異なる3種類の骨格データを用意し、512×512ピクセルのテクスチャ画像を合成した。骨格の枝の数はすべて3本とした。使用したハードウェアは、MacBook Air (1.4 GHz Core 2 Duo, 4 GB Memory)である。実験では、10回の計測を行い、平均値



(a) Straight grain sample by proposed method around a branch. (b) Cross grain sample by proposed method around a branch.

図 13 枝周辺位置での木目テクスチャ画像の合成例

Fig. 13 Examples of generated images at positions around a branch.

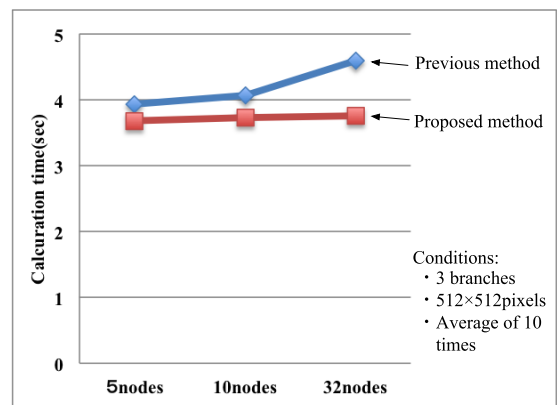


図 14 処理時間の比較

Fig. 14 Comparison of processing time.

を求めた。図 14 が比較実験の結果をグラフに表したものである。

このグラフから分かるように、曲線骨格モデル法は直線骨格モデル法よりもすべてのケースで計算時間が短かった。直線骨格モデル法では、骨格軸のノード数が増えるほど処理時間が増加しているのに対し、曲線骨格モデル法では、ノード数が増加しても処理時間はあまり増加しないことが分かった。これは対象ノードの決定が直線骨格モデル法では全ノードとの距離計算の結果から最も近いノードを求めるのに対し、曲線骨格モデル法ではz座標値の大小比較のみで対象セグメントを探すことができるためと考えられる。また、セグメント間のブレンド処理が必要ないことが、全体の計算時間短縮に貢献しているものと考えられる。

5.3 今後の課題

木目模様のリアリティは、模様の規則性と不規則性のバランスにより成り立っていると考えられる。リアリティを高めるためには、より自然な不規則性をどのように表現するかが重要である。今後は木目模様の形状の揺らぎや色のリアリティを向上させるための改良を行っていきたいと考えている。

6. おわりに

樹木の骨格モデルを用いたソリッドテクスチャリングによる木目画像の合成において、骨格軸を自由曲線で表現した骨格モデルを新たに提案し、年輪パターンの完全な3次元連続性を実現するとともに、骨格軸近くでも滑らかな年輪パターンを表現することができるようになった。また、処理時間もわずかだが短縮することができた。

これにより、これまでよりも切り出し位置の設定が自由に行えるようになり、合成されるテクスチャ画像のリアリティも向上させることができる。

本システムと3次元CGシステムを連携的に用いることにより、木材製品や建築物などのCGシミュレーションの質を高めることが可能である。

謝辞 本研究の実験にご協力いただいた長野県工科短期大学校情報技術科の学生の皆さんに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 中島正之: CGによる自然物体の生成に関する研究動向, 情報処理学会グラフィクスとCAD研究会報告, No.52-1, pp.1-6 (1991).
- [2] 高山健志, 五十嵐健夫: テクスチャ合成技術の新たな応用と展開, 情報処理, Vol.53, No.6, pp.582-588 (2012).
- [3] Ebert, D.S. et al.: *TEXTURING & MODELING A Procedural Approach*, Morgan Kaufmann, Inc. (2002). 川西裕幸 (訳), *TEXTURING & MODELING A Procedural Approach THIRD EDITION* 日本語版, ポーンデジタル (2009).
- [4] 中村匡司: 木材の見えと木質内装, 木材学会誌, Vol.58, No.1, pp.1-10 (2012).
- [5] Blinn, J.F. and Newell, M.E.: Texture and Reflection in Computer Generated Images, *Comm. ACM*, Vol.19, No.10, pp.542-547 (1976).
- [6] Peachey, D.R.: Solid Texturing of Complex Surfaces, *Computer Gr.*, Vol.19, No.3, pp.279-286 (1985).
- [7] 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).
- [8] 桃井貞美: 木質材料の質感表現手法とマルチメディア分野への応用, 長野県情報技術試験場研究報告, No.12, pp.1-6 (1996).
- [9] 鶴岡信治: ポテンシャル法を用いた木目の表示方法, *NICOGRAPH'85* 論文集, pp.83-88 (1985).
- [10] 柴崎 慧, 青山英樹: デジタルスタイルデザインに関する研究—木目模様デザインシステムの開発, 精密工学会誌, Vol.76, No.11, pp.1293-1298 (2010).
- [11] 佐々木尚孝: 木口面画像を用いた針葉樹材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, No.52-14, pp.93-98 (1991).

- [12] Takayama, K., Okabe, M., Ijiri, T. and Igarashi, T.: Lapped Solid Textures: Filling a Model with Anisotropic Textures, *SIGGRAPH 2008 Papers on the Web* (2008).
- [13] 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).
- [14] Marschner, S.R., Westin, S.H., Arbree, A. and Moon, J.T.: Measuring and Modeling the appearance of finished wood, *ACM SIGGRAPH 2005*, pp.727-734 (2005).
- [15] 中島孝行, 大野敏則: CAD・CG技術者のためのNURBS早わかり, p.40, 工業調査会 (1994).
- [16] コンピュータグラフィックス編集委員会: コンピュータグラフィックス, 第二版, p.65, CG-ARTS協会 (2009).
- [17] 山口富士夫: コンピュータディスプレイによる形状処理工学 [II], p.9, 日刊工業新聞社 (1984).



桃井 貞美 (正会員)

1981年信州大学理学部卒業。1984年長野県情報技術試験場勤務。2008年長野県工科短期大学校准教授, 2010年同校教授, 現在に至る。2012年信州大学大学院総合工学系研究科, コンピュータグラフィックス技術, マルチメディアコンテンツ技術, 映像システムの研究に従事。日本感性工学会会員。



高寺 政行

1981年信州大学繊維学部卒業, 1988年信州大学助手, 1997年同助教授, 2004年同教授となり現在に至る。博士(工学), 感性工学, 繊維・衣服への情報技術の応用研究に従事。繊維学会, 日本感性工学会, 日本機械学会, 映像情報メディア学会等各会員。