

## 枝分かれを考慮した木目の表現手法

桃 井 貞 美<sup>†</sup>

コンピュータグラフィックスによる木目の表現手法としては、実写画像をマッピングする方法と手続きにより三次元テクスチャを発生させマッピングする方法がある。後者は前者に比較してメモリ領域の節約、三次元連続性などの点で優れているが、リアリティーの向上が課題となっている。本論文では、従来よりもリアルなテクスチャを合成可能な、算術的手続きによる木目の表現方法について述べる。まず、木の成長過程における枝分かれを考慮に入れた骨格形状のモデルを提案し、このモデルを用いて年輪状のテクスチャを三次元的に生成する手法を示す。次に、この手法を拡張し、自然の木材で観察される、方角による年輪密度の違い、樹齢による成長速度の変化および年輪の揺らぎなどの現象を簡単なパラメータと計算式により表現可能であることを示す。本手法は、目的とする樹種の骨格的特徴や形態的特徴を表現でき、さまざまな切断面において、それに対応した多様なテクスチャを合成可能である。部品数が多く実写画像を用意するのが困難な場合には、本手法は特に有用である。また、従来の手続き型手法と比較して、節の表現が簡単にできるので、唐松の小径材など節を特徴とする素材を用いた製品のシミュレーションにおいて、画像のリアリティーを向上させることができる。

### A Method to Represent Wood Grain by Using Ramification Model

SADAYOSHI MOMOI<sup>†</sup>

In computer graphics, mapping the natural images or synthesizing images by mathematical procedures are used for expression of wood grain. Mapping is very simple and realistic, but that needs a lot of memory area. A large memory area is not necessary for synthesizing, and we have only to arrange value of some parameters to get various textures. In this paper, a new image synthesizing method which can generate wood textures having gnarl more realistic by means of taking the growing process of a tree into consideration is described. At first, I propose the ramification model which is represented by the fundamental function of creating annual rings three-dimensionally, then show that any textural features, such as tapered shape, directional distinction of radius, decrease of growing speed with aging and natural sway of annual rings, can be simulated by extension of this function.

#### 1. はじめに

工業製品のデザインへのコンピュータグラフィックス(以下「CG」という)の応用は、ワークステーションの低価格化とソフトウェアの改良によって大変身近なものとなった。これまで工業デザインにおけるCGの活用は、主にCADの中で形状を確認する機能を拡張することに重点が置かれてきたが、今後は材質の違いによる質感の変化や感性面でのデザイン評価という観点からも応用が期待される。対象となる素材も広がりを見せ、金属やプラスチックなど均質な材料だけで

なく、不均質な材料である自然物も重要な構成要素となってきた。そのため、近年では自然物の表現技術に関する研究が盛んに行われている<sup>1)</sup>。

自然物の中で木材は、建築物、インテリア製品、家具、工芸品など最も幅広く身近な素材の一つである。CGによる木目の表現手法を確立することは、これらの分野におけるデザイン工程の合理化と、デザインそのものの高度化を図る上で有用である。

CGによる木目の表現手法は、二次元の実写画像を三次元の物体表面に張り付けるテクスチャ・マッピング<sup>2)</sup>による方法と算術的手続きにより三次元テクスチャを発生させマッピングするソリッド・テクスチャ<sup>3)</sup>による方法に大別される。

テクスチャ・マッピングは通常、面単位に処理され

<sup>†</sup> 長野県情報技術試験場  
Information Technology Research Institute of  
Nagano Prefecture

るため面の接続部で模様連続でなく、向きにも整合性がない。また曲面にマッピングしたときに、歪みを生じる。木口面画像を三次元的に投影する方法<sup>4)</sup>は、この問題を解決したが、枝分かれによって生じる節の表現はできない。テクスチャ・マッピングでは、あらかじめ二次元画像を用意しておかなければならず、そのための大きなメモリ領域を必要とする。

ソリッド・テクスチャを応用した木目の合成方法もいくつか報告されている。ポテンシャル法を応用した手法<sup>5)</sup>は理論的には枝分かれを表現可能だが、無限回のポテンシャル計算を必要とするなど実用的ではない。この他にも自然な揺らぎを付与する手法に関する報告<sup>6)</sup>があるが、節の表現が実的に可能な方法は見あたらない。景観シミュレーションを目的として樹木の成長をモデル化する試みは数多く行われているが<sup>6)-11)</sup>、木目の発生を目的として樹木の成長課程にまで逆上り、モデル化を試みた研究はこれまで行われていない。

本稿では、従来よりもリアルなテクスチャを合成可能な、ソリッド・テクスチャによる木目の合成方法について述べる。まず、木の成長過程における枝分かれを考慮に入れた骨格形状のモデルを提案し、このモデルを用いて年輪状のテクスチャを三次元的に生成する手法を示す。次に、この手法を拡張し、自然の木材で観察される、方角による年輪密度の違い、樹齢による成長速度の変化および年輪の揺らぎなどの現象を、簡単なパラメータと計算式により表現可能であることを示す。

この方法の最大の特徴は、節の表現が可能なことである。近年では小径材の集成技術が発達したことや、消費者の嗜好の多様化にともなって、節を有する木材がデザインの中で積極的に活用されるようになってきた。CGにより節のある木材が表現できるようになれば、CGの適用分野が広がり、木材製品のデザイン評価における精度を向上させることが可能である。

## 2. 木の骨格と成長過程のモデル化

樹木は幹や枝の先端に頂端分裂組織を持ち、細胞を生み出しながら伸長成長する。また、樹皮直下の形成層と呼ばれる組織が細胞分裂しながら肥大成長する<sup>12)</sup>。この伸長成長と肥大成長により、樹木はその容積を増大してゆく。

本手法では、この成長過程を図1のようなモデル(以下「成長モデル」という)で考える。成長モデル

による樹木(以下「モデル樹木」という)は、幹と枝の中心軸の形状を骨格と考え、これを線分に置き換えて単純化する。骨格形状は、一本の滑らかなポリラインにより幹を、また幹上に始点を持つ半直線によって枝を表現する。骨格形状は、あらかじめ定義しておく。

モデル樹木では、成長先端が成長原点を出発点として、骨格上を伸長成長していく。骨格が枝分かれている箇所では、成長先端も分化し、別々に成長していく。また、樹皮面は骨格と垂直方向に肥大成長していく。

木材内の空間に存在する一点  $P$  が、年輪上のどこに位置するかを知るには、木の樹皮面が成長原点  $O$  から出発して、成長しながら点  $P$  に到達するまでの経過時間(以下「成長経過時間」という)を求めればよい。図2に成長経過時間の求め方を示す。成長モデルによれば、成長経過時間  $T$  は、次式で表すことができる。

$$T = Ta + Tb. \quad (1)$$

ただし

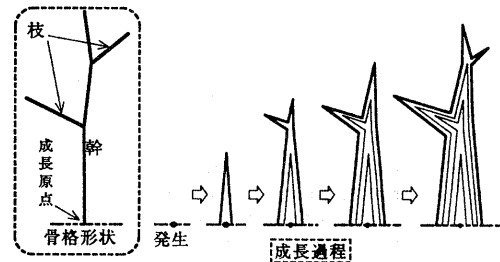


図1 モデル樹木の骨格と成長過程

Fig. 1 A typical frame shape and the model of growing process.

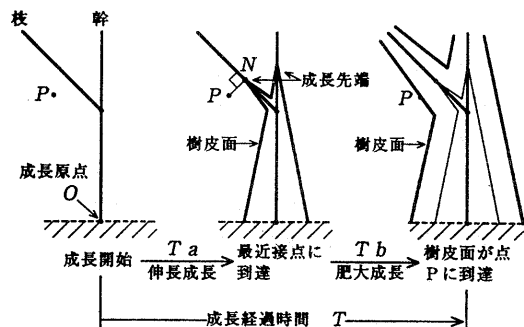


図2 成長経過時間の求め方

Fig. 2 Calculation of the passed time until the surface has reached at certain point.

$Ta$ : 成長開始から成長先端が骨格上を点  $P$  の最近接点  $N$  まで伸長成長するのに要した時間,

$Tb$ : 樹皮面が点  $N$  から骨格と垂直方向に点  $P$  まで肥大成長するのに要した時間,

成長先端が骨格上を成長していく速度と樹皮面が肥大する速度を一定と考えれば, 式(1)の各項は次式で表すことができる.

$$Ta = Da/Sb, \tag{2}$$

$$Tb = Db/Sb. \tag{3}$$

ただし

$Sa$ : 伸長成長速度,

$Sb$ : 幹の肥大成長速度,

$Da$ : 伸長成長経路の距離,

$Db$ : 肥大成長経路の距離.

枝を経由した場合は, 式(3)の代わりに次式を用いる.

$$Tb = Db/\gamma Sb. \tag{3'}$$

ただし

$\gamma$ : 幹に対する枝の肥大成長速度比.

点  $P$  に樹皮面が到達するための成長経路は, 通常の場合複数存在する. 幹だけを経由する経路と, 幹から枝を経由する経路について別々に成長経過時間を求め, 後述の方法でブレンドする. 枝を経由した経路が複数存在する場合は, 成長経過時間が最も短い経路を採用する.

幹がポリラインで定義されていて, 直線的でない場合, 骨格線分の接続点付近で複数の経路が考えられる領域が生じる. 図3に, このような場合の接続点付近での成長経過時間を計算する方法を示す. まず2本の骨格線分  $E_1, E_2$  を中心軸とする半径の大きな円柱を考え, 空間をこの円柱のどちらか一方だけに含まれる

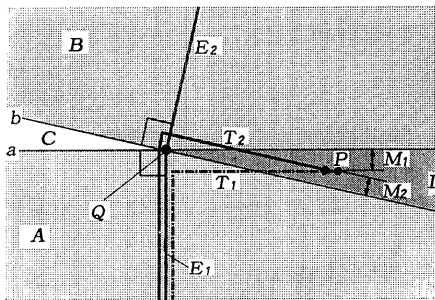


図3 幹接続部付近の処理

Fig. 3 The smoothing process around the node of the trunk.

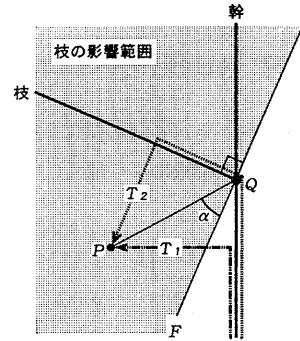


図4 幹と枝の接続部付近の処理

Fig. 4 The smoothing process for the middle area between a trunk and a branch.

領域  $A$  と  $B$ , どちらにも含まれない領域  $C$ , 両方に含まれる領域  $D$  の四つに分類する. 領域  $A, B$  では, それぞれ近い方の骨格線分を対象に最近接点を求め, この点を肥大成長の開始点として成長経過時間を求める. 領域  $C$  では, 接続点  $Q$  を肥大成長開始点として成長経過時間を求める. 領域  $D$  に含まれるある点  $P$  では, 二本の骨格線分についてそれぞれを経由した場合の成長経過時間を求め, また接続点  $Q$  を通り  $E_1, E_2$  に垂直な二平面  $a, b$  と点  $P$  との距離  $M_1, M_2$  を求め, 次式によりブレンドされた成長経過時間を求める.

$$T = \frac{T_1 M_1 + T_2 M_2}{M_1 + M_2}. \tag{4}$$

ただし

$T_1$ :  $E_1$  を経由した成長経過時間,

$T_2$ :  $E_2$  を経由した成長経過時間.

図4に, 幹と枝の接続部付近での年輪を滑らかに接続するための成長経過時間の計算方法を示す. まず, ある点  $P$  について幹と枝それぞれの最近接点を經由した時の成長経過時間  $T_1, T_2$  を求める. 枝の端点  $Q$  を通り枝に垂直な平面  $F$  とし, 点  $Q$  と点  $P$  を結ぶ線分と平面  $F$  との角度を  $\alpha$  とし, 次式により  $T_1, T_2$  をブレンドして, 点  $P$  の成長経過時間とする.

$$T = \frac{T_1 T_2 \sin \alpha}{T_1^2 + (T_2 \sin \alpha)^2} \tag{5}$$

### 3. 年輪の生成

#### 3.1 早材・晩材による色変化

気温や日射量など1年の気候変動により, 一般的に樹木には年輪が形成される. 1年輪内では, 早材と呼

ばれる部分から晩材と呼ばれる部分へと組織が変化し、色は淡色から濃色へと変化する。この色変化が創り出す縞模様は、木目の材質感において主要な位置を占めている。

モデル樹木では、あらかじめ定義された早材色と晩材色を次式のような関数により補間して年輪を生成する(図5参照)。

$$E = \sin^n \left( \text{mod} \left( T, \frac{\pi}{2} \right) \right),$$

$$C[rgb] = E Cd[rgb] + (1-E) CI[rgb]. \quad (6)$$

ただし

$n$ : 早材と晩材の比率を調整するパラメータ,

$\text{mod}(a, b)$ :  $a/b$  の剰余,

$T$ : 成長経過時間,

$E$ : 晩材色の混合比率,

$C[rgb]$ : 物体上の一点の RGB による色レベル,

$Cd[]$ : 晩材色,

$CI[]$ : 早材色

を表す。

### 3.2 心材と辺材による色変化

木材の色は、季節変動だけでなく、細胞自身の長期的な成長レベルによっても変化する。樹木の中心部分は心材と呼ばれ、細胞壁への沈着物のため濃い色をしている。その外側は比較的若い細胞から成る辺材と呼ばれる領域で、淡い色をしている。モデル樹木では、図6に示すように一定の成長経過時間内を心材域、その外側を心材から辺材への移行域、さらに外側を辺材域とする。心材域と辺材域ではあらかじめ標準色に対するオフセット値を決め、移行域では直線補間によりオフセット値を求める。

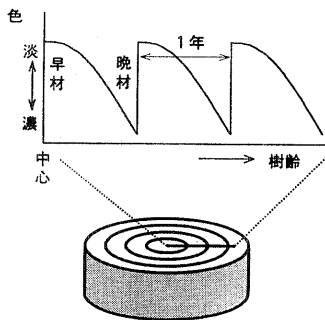


図5 年輪の着色関数

Fig. 5 The coloring function to create annual rings.

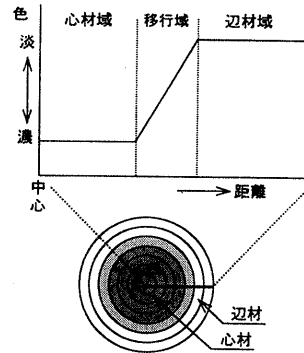


図6 心材から辺材への色変化関数

Fig. 6 The function about color change between heartwood and sapwood.

## 4. 自然な木目の表現手法

### 4.1 方角による影響

太陽光の照射方向などの影響で、樹木の年輪密度は普通南側の方が粗い。この現象をモデル樹木では、太陽に向かい合う側の樹皮面の肥大成長速度を速くすることにより表現する。標準の肥大成長速度を  $S$ 、太陽の平均的光線ベクトルと樹皮面の法線ベクトルとの角度を  $\beta$  とすると、方角による影響を考慮した肥大成長速度  $S'$  は、次式で求める。

$$S' = S(1 - \varepsilon \cos(\beta)). \quad (7)$$

ただし

$\varepsilon$ : 方角による影響量を調節するパラメータ。

### 4.2 樹齢による影響

樹木の成長速度は、樹木の成長レベルにより変化する。中心部では年輪が粗く、外周部では密になる。モデル樹木では、肥大速度を軸を起点として最初は早く、その後次第に遅くすることにより、この現象を表現する。成長経過時間を求める式のうち、肥大成長に関する式(3)を次式のように変形する。

$$Tb = (Db/Sb)^\delta, \quad \delta > 1. \quad (8)$$

ただし

$\delta$ : 年輪密度が変化する度合いを調節するパラメータ。

簡略化のため、伸長成長の速度については常に一定と考える。

### 4.3 幹や枝の先細り

樹木はその大きな体を支えるため、末端に比べ根元が太い安定した形状をしている。これは、年輪の数の違いによるだけでなく、肥大成長速度が根元ほど早

く、先端に行くほど遅いためと考えられる。モデル樹木では、肥大成長速度  $Sb$  を次の式で補正することにより、これを表現することができる。

$$Sb' = (1 + \nu\omega^{T\epsilon})Sb, \quad (9)$$

$$0 < \omega < 1.$$

ただし

$Sb'$ : 補正後の肥大成長速度

$\nu$ : 先細りの影響量を調節するパラメータ,

$\omega$ : 先細りが急激か穏かかを定めるパラメータ.

#### 4.4 節の発生と枝の立枯れ

節は小さな枝の部分が他の部分に比べ濃色をしているために現れる模様である。本手法では枝分かれをモデル化しているため、節の表現が可能である。節の部分を特別着色しなくても、心材と辺材の色の変化が枝の回りでは顕著に現れるため、節を表現することは可能である。積極的に節の部分の色を強調したい場合は、枝との距離がある一定範囲内に入る領域について、色を濃色側にシフトさせれば良い。

また、針葉樹などでは樹高が増すにつれ、下枝が立枯れを起す現象が見られる。モデル樹木では、枝の肥大成長を一定の時期を境に急速に収束させることにより、立枯れした枝を表現することができる。これを式で表すと次のようになる。

$$T > T_{lim} \text{ ならば, } T' = T(T/T_{lim})^\epsilon,$$

$$T \leq T_{lim} \text{ ならば, } T' = T. \quad (10)$$

ただし

$T_{lim}$ : 立枯れ境界時間,

$T$ : 立枯れを考慮しない成長経過時間,

$T'$ : 立枯れを考慮した成長経過時間,

$\epsilon$ : 成長が収束する速さを調節するパラメータ.

#### 4.5 揺らぎの生成

自然の木材では、木目は完全に均一ではなく、複雑な揺らぎを持っている。合成した木目を自然に見せるためには、自然な揺らぎを付与することが不可欠である。

揺らぎの生成手法には、正弦波を利用した方法<sup>9)</sup>、乱数による方法<sup>5)</sup>、三次元ランダム・フラクタルによる方法<sup>12)</sup>などが報告されている。モデル樹木では、複数の正弦波を合成した揺らぎ関数を用いて座標値をシフトさせることにより、揺らぎを与える。この方法は、滑らかな模様の連続性が保たれ、また、揺らぎの形状を容易に制御することができるというメリットがある。

揺らぎの与え方には、座標値をシードとして座標値

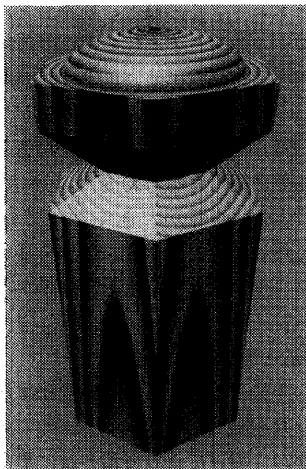
を各座標軸方向にシフトさせる方法と、座標値または肥大成長の方向ベクトルをシードとして得た変移率を肥大成長距離へ乗算する方法がある。前者は、揺らぎの方向が骨格の形状や木の成長方向と全く関係がないため、やや不自然な揺らぎになるという短所がある。また、後者は、骨格軸に揺らぎを与えることができず、距離が大きいほど揺らぎ量が大きくなってしまふ。両者を複合的に用いることにより、欠点を補うことができる。通常は、前者だけでも十分な効果が得られる。

#### 4.6 ミクロな構造と色のばらつき

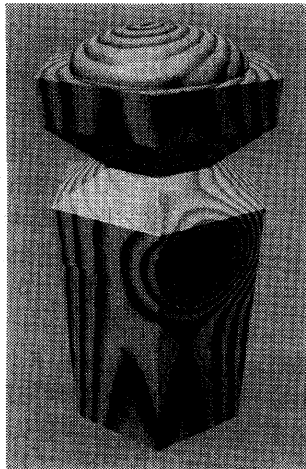
木材の材質感、年輪によるマクロな色変化に加えて、道管などミクロな組織による色変化も無視できない要素である。しかし、樹種により多種多様に異なるミクロな組織の構造をモデル化することは困難である。そこで、本手法では簡易にミクロな組織の材質感を表現するために、明度シフトのための二次元配列を軸方向に投影する方法を用いた。16×16 程度の配列を用意し、これに乱数により発生したある範囲内の明度シフト量をセットする。これを、幹の軸と垂直方向の平面上に適当なスケールで敷き詰め、軸方向に投影し、各点の RGB 値をシフトさせる。この方法は、二次元の座標値の剰余計算だけで、色のシフト量が求まるので、少ない負荷でリアリティーを向上させることができる。枝の近傍では、投影方向と木目の方向が合わないため、不自然さが生じるが、得られる効果に比べれば大きな問題とはならない。

## 5. 実験例

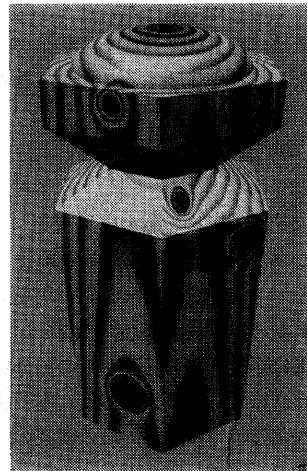
図7に本手法により合成した典型的な木目の表現例を示す。自然の樹木では、枝の発生頻度と太さ、木目の揺らぎ方などが樹種によって異なる。一般的に杉などの針葉樹は幹の直線性が高く、枝の立ち枯れる度合いが大きい。樺など広葉樹では、下枝が太く成長し、幹の直線性は低い。(a)は、枝分かれない骨格で、4.1節から4.5節までの自然な木目の表現のための処理を行わずに合成した基本的な木目模様の例である。(b)は、枝の肥大成長速度を比較的速くし、幹の骨格は少し屈折させ、また、揺らぎを大きくして、広葉樹的な特徴を表現した例である。(c)は、1本の幹と複数の枝から成る骨格により、揺らぎの少ない針葉樹的な特徴を表現した例である。節の部分については、枝の成長速度を減衰させ、また枝に近い領域の明度を低くして強調している。



(a) 基本的な模様  
(a) A basic pattern without the naturalizing process.



(b) 広葉樹材の表現例  
(b) A representation example of a dicotyledonous wood.



(c) 針葉樹材の表現例  
(c) A representation example of a coniferous wood.

図 7 木目模様表現例

Fig. 7 Representation examples.

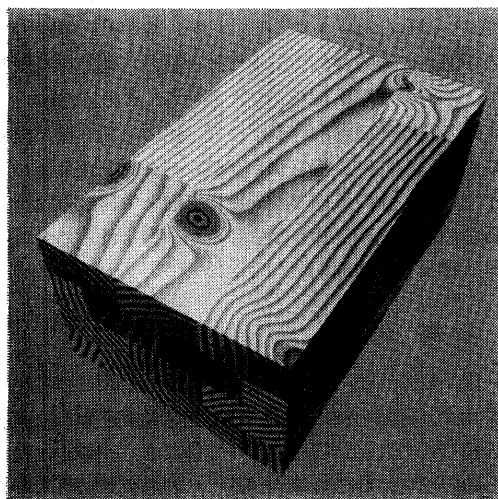


図 8 集成材ブロックの表現例

Fig. 8 A representation example of a glued laminated wood.

ソリッド・テクスチャでは、テクスチャ座標系から物体座標系へテクスチャを投影する。この際の座標変換を任意に変化させれば、一つの骨格形状から多様なテクスチャを生成することができる。図 8 は、この方法を用いて集成材のブロックを表現した応用例である。

画像の合成は、自作のレイ・トレーシングのプログラムで行った。

## 6. むすび

本文では、CG により木材の表面のテクスチャを表現するための一手法について述べた。まず、あらかじめ幹と枝を表す線分により定義された骨格形状に従い、骨格の軸方向への伸長成長と、軸に対し垂直方向の肥大成長によって成長する樹木のモデルを提案した。次に三次元的に年輪を形成し、これに揺らぎ、方向性などを付与することにより自然の木材で観察される形態的特徴を表現できることを示した。

これまで、CG のための木目の表現手法の中で、木の成長過程と骨格形状をモデル化した例はなかった。今回提案したモデルにより、これまで困難であった枝分かれによって発生する節の表現が可能になり、現実感のある木目を表現できるようになった。特に、節を多く持つ唐松の小径材などを材料とする製品のデザイン・シミュレーションにおいて、デザイン評価の精度を向上するのに貢献できるものと期待される。

今回は、樹木のマクロな構造についてほぼ満足できるモデルができたが、道管や放射組織といった細胞レベルでのモデルは、まだできていない。また、揺らぎや色など樹種に固有な特徴についての分析を行っていないため、樹種ごとの最適なパラメータの設定に関するデータベースができていない。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) 中嶋正之: 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) Blinn, J.F. and Newell, M.E.: Texture and Reflection in Computer Generated Images, *Comm. ACM*, Vol. 19, No. 10, pp. 542-547 (1976).
- 3) Peachey, D.R.: Solid Texturing of Complex Surfaces, *Computer Gr.*, Vol. 19, No. 3, pp. 279-286 (1985).
- 4) 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).
- 5) 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).
- 6) 大川俊一, 千葉則茂: CG のための樹木の成長モデル—架空の植物ホルモンによる樹形の制御—, 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会報告, No. 62-6, pp. 39-46 (1991).
- 7) 安居院猛, 福田智美, 中嶋正之: 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).
- 8) 大崎恵一, 山本 寧, 鈴木悌司, 佐藤 創: 樹形モデルを用いた針葉樹の表現, 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会報告, No. 52-4, pp. 19-26 (1991).
- 9) 春口 巖: 関数形式による樹木モデリングシステム, 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会報告, No. 52-5, pp. 27-34 (1991).
- 10) 乃万司: 植物の成長/非成長モデル—環境の影響の非成長的表現に向けて—, 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会報告, No. 52-6, pp. 35-42 (1991).
- 11) 金丸直義, 高橋清明, 千葉則茂, 斎藤伸自: 潜伏芽と力枝を考慮した樹木の成長モデル, 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会報告, No. 52-7, pp. 43-50 (1991).
- 12) 岡田 稔, 横井茂樹, 鳥脇純一郎: 画素シフト法に基づく非解析的テクスチャとその自然対象物生成への応用, 情報処理学会グラフィクスと CAD 研究会報告, No. 40-2, pp. 9-16 (1989).
- 13) 浅野猪久夫(編): 木材の事典, 朝倉書店 (1991).  
(平成 5 年 10 月 7 日受付)  
(平成 5 年 12 月 9 日採録)



桃井 貞美 (正会員)

1959 年生. 1981 年信州大学理学部化学科卒業. 同年, 長野県庁入庁. 1984 年長野県情報技術試験場勤務. 以来, ニットデザインシステム, 3次元図形簡易入力システム, 木製品デザインシステムなどの研究開発に従事.