

信州大学審査学位論文

コンピュータグラフィックスによる
木材の質感表現の高度化に関する研究

2015年9月

桃井 貞美

目 次

第1章 序論

| | |
|----------------------|---|
| 1.1 本研究の背景 | 1 |
| 1.1.1 生活に欠かせない木材 | 1 |
| 1.1.2 木材の心理的効果 | 2 |
| 1.1.3 樹体の構造 | 3 |
| 1.1.4 CGによる木材の表現技術 | 4 |
| 1.2 本研究の目的 | 6 |
| 1.3 本論文の構成と要旨 | 6 |
| 1.4 枝分かれを考慮した木目の表現手法 | 7 |

第2章 曲線骨格モデルを用いた3次元連続な木目模様の生成

| | |
|-----------------------|----|
| 2.1 緒言 | 10 |
| 2.2 直線骨格モデルの問題点 | 11 |
| 2.3 曲線骨格モデルの提案 | 11 |
| 2.3.1 曲線骨格モデルの前提条件 | 12 |
| 2.3.2 骨格ノードを通る自由曲線の決定 | 14 |
| 2.3.3 成長モデルの改良 | 14 |
| 2.3.4 骨格曲線の最適化 | 15 |
| 2.3.5 成長経過時間の計算 | 17 |
| 2.3.6 枝の周辺での処理方法 | 18 |
| 2.3.7 画像合成実験 | 20 |
| 2.3.8 処理時間の計測 | 22 |
| 2.4 結言 | 24 |

第3章 年輪形状の自然なゆらぎ表現によるリアリティの改善

| | |
|---------------------------|----|
| 3.1 緒言 | 25 |
| 3.2 これまでの年輪ゆらぎ表現技術 | 25 |
| 3.2.1 これまでの木目模様生成技術とゆらぎ表現 | 25 |
| 3.2.2 ゆらぎの数式表現 | 26 |
| 3.3 実際の樹木の年輪解析 | 28 |
| 3.3.1 樹体軸の曲がり | 28 |
| 3.3.2 年輪間隔のゆらぎ | 29 |

| | | |
|-------|----------------|----|
| 3.3.3 | 円周方向のゆらぎ | 30 |
| 3.4 | 年輪ゆらぎの発生モデルの提案 | 31 |
| 3.4.1 | 骨格モデル法の座標系 | 31 |
| 3.4.2 | ゆらぎの三要素 | 31 |
| 3.5 | ゆらぎ関数の提案 | 33 |
| 3.5.1 | ゆらぎ関数の条件 | 33 |
| 3.5.2 | 年輪間隔ゆらぎ関数 | 34 |
| 3.5.3 | 円周方向ゆらぎ関数 | 35 |
| 3.6 | レンダリング実験 | 36 |
| 3.7 | リアリティの評価 | 40 |
| 3.7.1 | 評価実験の方法 | 40 |
| 3.7.2 | 評価結果 | 41 |
| 3.8 | 結言 | 42 |

第4章 汎用木目テクスチャ生成システムへの実装

| | | |
|-------|--------------------------|----|
| 4.1 | 緒言 | 44 |
| 4.2 | システムの概要 | 44 |
| 4.3 | 年輪カラーパターンのサンプリングとデータベース化 | 47 |
| 4.3.1 | スキャナによる取り込み方法の検討 | 47 |
| 4.3.2 | デジタルカメラによる撮影方法の検討 | 50 |
| 4.4 | システムの処理フロー | 50 |
| 4.4.1 | 形状データの入力 | 54 |
| 4.4.2 | 骨格形状データの編集 | 54 |
| 4.4.3 | テクスチャ位置の調整 | 56 |
| 4.4.4 | テクスチャの生成 | 57 |
| 4.4.5 | 枝の周辺処理 | 59 |
| 4.4.6 | 樹体の形状特性の近似 | 60 |
| 4.4.7 | 不規則化による自然な模様の生成 | 62 |
| 4.5 | 樹種ごとのゆらぎパラメータ値の決定 | 64 |
| 4.5.1 | イメージスケールによる最適値の計測 | 64 |
| 4.6 | 評価実験 | 66 |
| 4.6.1 | 色のリアリティ評価 | 66 |
| 4.6.2 | ゆらぎのリアリティ評価 | 67 |
| 4.6.3 | 様々な樹種の表現 | 71 |
| 4.6.4 | CGアプリケーションとの連携実験 | 71 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 4.6.5 結果の考察 | 73 |
| 4.7 結言 | 74 |
| 第5章 結論 | |
| 5.1 本論文で得られた成果 | 75 |
| 5.1.1 曲線骨格モデルの導入による成果 | 75 |
| 5.1.2 年輪パターンのゆらぎモデル導入による効果 | 75 |
| 5.1.3 汎用木目テクスチャ精製システムの開発 | 76 |
| 5.1.4 市販CGアプリケーションとの連携 | 76 |
| 5.2 今後の課題 | 76 |
| 参考文献 | 78 |
| 本論文に関する発表論文等 | 81 |
| 謝辞 | 82 |

第 1 章

序論

第1章 序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 生活に欠かせない木材

我々が暮らす空間や道具には，至る所に木材が使われており，木材は人間の生活の中で欠かすことのできない材料である．農林水産省が発表する木材統計[1]によれば，平成26年度の需要量（パルプ・チップ用を除く用材）は，21.1百万m³となっている．高度成長時代に比べると，森林保護の流れの中で減少傾向にはあるものの，建築物，家具など工業製品の材料として，莫大な量が加工されていることがわかる．

材種別（パルプ・チップ用を除く）の需要量は，平成26年度の国産材が15.4百万m³，外材が5.7百万m³である．表1.1に国産材の樹種別供給量を示す．国産材の主な樹種は，すぎ，ひのき，からまつ，えぞまつ・とどまつ，あかまつ・くろまつ，広葉樹などである．表1.2に外材の材種別供給量を示す．世界中から多種多様な木材が輸入されていることがわかる．

表1.1 国産材の需要部門別、材種別素材供給量（平成26年度）

単位：千m³

| 供給量 需要部門 | | 針葉樹 | | | | | | | 広葉樹 |
|-------------|--------|--------|-------|-------|-------|-----------|-----------|-----|-----|
| | 計 | 小計 | すぎ | ひのき | からまつ | えぞまつ・とどまつ | あかまつ・くろまつ | その他 | |
| 製材用 | 12,211 | 12,116 | 7,872 | 2,039 | 1,270 | 704 | 176 | 55 | 95 |
| 合板用 | 3,191 | 3,191 | 2,111 | 126 | 681 | 94 | 152 | 13 | 14 |
| 計 | 15,402 | 15,293 | 9,983 | 2,165 | 1,951 | 798 | 328 | 68 | 109 |
| 構成比(%) | 100 | 99 | 65 | 14 | 13 | 5 | 2 | 0 | 1 |

表1.2 外材の需要部門別、材種別素材供給量（平成26年度）

単位：千m³

| 区分 | 計 | 南洋材 | 米材 | 北洋材 | ニュージーランド材 | その他 |
|--------|-------|-----|-------|-----|-----------|-----|
| 入荷量 | 5,669 | 304 | 4,238 | 436 | 524 | 167 |
| 構成比(%) | 100 | 5 | 75 | 8 | 9 | 3 |

木材は、生物由来の材料であり、その構造はとても複雑で、金属、プラスチック、コンクリートなど他の無機質な材料には無い美しさと風合いに富んでいる。住宅や家具など、直接人が触れるものに好んで用いられるのは、そのためである。

また、木材は非常に耐久性の高い材料でもある。世界最古の木造建築物として、法隆寺伽藍がユネスコの世界遺産[2]に登録されたのは記憶に新しいが、1300年以上前の建造物が現存している。それゆえ、木材は再利用されることも多い。材料となる樹木については、屋久島の縄文杉などのように、さらに長い年月生き続けているものもある。こうした樹木から取れる木材は、たいへん貴重な材料であり、慎重に無駄なく利用されなければならない。

木材は樹種によってその物理的な性質や耐久性、風合いが異なり、用途に応じて最適な樹種が用いられる[3]。建築においては、柱にはヒノキ、スギ、ツガなど、はりにはアカマツ、ベイマツ、ベイツガなど、床にはブナ、ナラ、天井にはスギ、ヒノキ、サワラなど、床柱にはスギなどの磨丸太、コクタン、シタンなどが用いられる。家具では、キリ、ケヤキ、チーク、カツラ、ミズナラなどが多く用いられる。また、楽器では、三味線にシタン、カリン、太鼓にケヤキ、サクラ、ピアノやギターにはエゾマツ、スプルース、管楽器にはコクタン、サクラなどが用いられる。このように用途に応じて色や硬さ、加工しやすさ、変形の度合い、響きなど、経験則から最適な樹種が見出されている。

最近では、木材を張り合わせて加工する技術[4]も進歩し、小さい材をつないで大きな材にし、さらに表面に木目の美しい木材を薄く貼り合せた集成材が多く用いられるようになった。集成材の技術により、端材の有効活用が進み、これまでは難しかった大規模な構造の建築物にも木材が用いられるようになった。

木材は、多種多様な用途に様々な形態で用いられるようになってきた一方で、乱開発や酸性雨、木材の無駄使い、によって、資源が減少し、価格も上昇してきている。木材製品の設計開発において、コンピュータグラフィックスによるシミュレーションを取り入れ、無駄なく効率的に材料を加工することが、これからの社会では求められる。

1.1.2 木材の心理的効果

増田は、木目模様がなぜ「なごむ」のかについて、木材の成長輪のパターンがほぼ平行でわずかにゆらいでいることが関係していると述べている[5]。木材には、いやし効果があると言われており、その具体的な効果を実験により明らかにしようという試みが行われている[6]-[8]。仲村は、木目の整然としたパターンだけでなく、節など欠点の量や溝の間隔と「自然な」イメージ、「感じのよい」イメージとの関係を調べ、どのような心理効果を及ぼすのかについて、報告している[9]。節は、「自然な」イメージに関係していることから、意図的に節の多い小径木を用いることもあり、CGシステムがこれらを表現できることは重要であると考えられる。また、仲村の研究では、節の間隔にある程度の変動が

ある方が自然で美しいイメージを与えることが報告されており，CGシステムでデザインをシミュレーションする際に，1枚の画像を繰り返し配置するような方法は，誤った印象を与える恐れがあることを示唆している．

工業製品の視覚的イメージに影響を与える要因のなかで，色彩もまた重要である[4]．明度の高い色は，「明るい」雰囲気を与え，木材のYR（黄赤）系の色相は，「あたたかい」イメージを与えられている．木材は，樹種ごとに特徴的な木目模様と色を持っており，どの樹種を材料に用いるかにより，与える心理的な印象が変化すると考えられる．デザインのねらいに応じて，どの樹種が最適なのか十分検討する必要がある，CGを用いたシミュレーションはそのためのツールとして用いられることが多い．

1.1.3 樹体の構造

図1.1に樹体の基本方向と基本断面を示す．樹木の幹はほぼ円柱の形をしている．構造は細長い細胞が縦に並んでいる軸方向，中心軸からの放射方向及び同心円上に形成される層に対して接線方向が基本三方向と呼ばれる．そして部材として加工される際には，軸に直角に切った横断面（木口面），軸に平行で放射方向に切った放射断面（柃目面）及び軸に平行に接線方向に切った接線断面（板目面）が基本三断面と呼ばれる．[10] これらの断面に現れる木目模様をモデル化するためには，樹木の成長過程を考慮する必要がある．

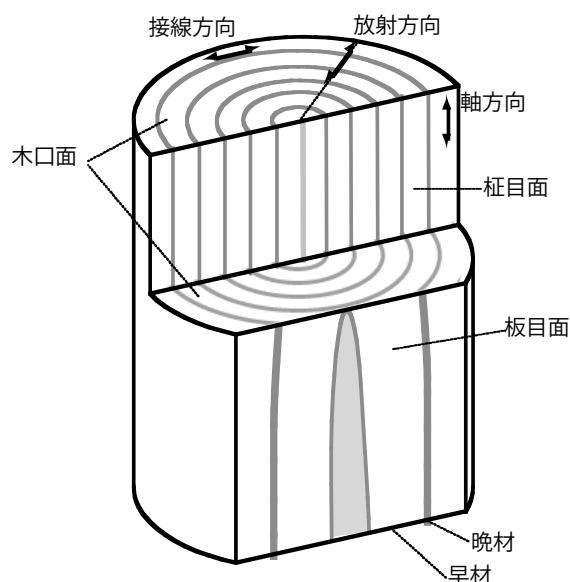


図1.1 樹体の基本方向と基本断面

(木の研究会著，「世界で一番くわしい15木材」，エクスナレッジ刊を参考に作成)

樹木の内部を放射方向に観察すると、中心軸付近の樹心、中間部の木部、外側の樹皮の3つの部分で構成されていることがわかる。樹木は樹皮直下の形成層の柔細胞が分裂し、その外側に樹皮、内側に木部を形成して成長（肥大）していく。木部は根から葉へ水分を送るだけでなく、樹体を支える役割を果たしている。葉で作られた養分は樹皮部を通して樹全体へ運ばれる。新しく形成される細胞は、春から夏にかけてつくられる早材（春材）と夏から秋にかけてつくられる晩材（秋材）で、大きく性質が異なる。早材は細胞壁が柔らかく大きく成長し、白い（明るい）色をしている。晩材は細胞壁が厚く、成長が遅いので硬くなり、濃い（暗い）色をしている。[11]

1年ごとに、早材と晩材が繰り返し形成されるため、木口面で見ると成長とともに同心円状の成長輪（以下「年輪」という）が形成されていく。成長速度は、その年の気候に左右されるため、年ごとに年輪間隔が変動する。

木部の中心に近い部分は心材と呼ばれ、針葉樹では色素やリグニン沈着により、また広葉樹では酵素の酸化により赤く発色する。[11]

針葉樹の組織の90%は、水分を運ぶパイプと樹体を支える機能を兼ねる仮導管と呼ばれる組織が占め、縦長の細胞が整然と並んでいる。広葉樹は、水分を運ぶ導管と樹を支える木組織に分化しており、針葉樹よりも複雑な構造をしている。繊維質が多いため固く、導管の並び方が樹種により異なり、このことが多様な木肌や木目となって現れる。

木材の表面に現れる木目模様を特徴付ける要素としては、主に次のものが考えられる。

- (1) 仮導管や導管、木組織など微細な組織が形成する年輪のカラーパターン。
- (2) 年輪形状の不規則性
- (3) 放射組織や繊維の配向に起因する異方性反射。
- (4) 大域的な色むら。

様々な樹種の木目模様[12]を観察してみると、針葉樹のほとんどと広葉樹の多くの樹種では、(1)の年輪カラーパターンと(2)の年輪形状の不規則性が樹種の特徴を決定する最も大きな要素であることがわかる。

1.1.4 CGによる木材の質感表現技術

近年、工業製品のデザインにおいて、CG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。金属やプラスチックに比べ、自然物を材料とする製品は加工が難しく、また材料自体も貴重であるので、事前にシミュレーションにより十分な検討が必要である。特に建築物は、やり直しができないことから、CGによる精密な評価が必須となっている。

CGで自然物の質感を表現するのは、金属やプラスチックの場合よりも難しい。大きな理由は、複雑なテクスチャを持つためである。この問題を解決するために、様々な研究

が行われてきた[13-15]。この中には、木材の質感表現技術に関する研究も多く含まれている。

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。一つ目の方法は、実写の木目画像をマッピングする手法[16]で、二つ目の方法は、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[17]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と比べると劣っているという短所を持っていた。

以下に具体的な手法を比較してみる。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[18]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[19]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[20]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しラッピングする手法[21]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。樹木のミクロな組織の表現手法が報告されている[22,23]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。

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[24]。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[25]。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言える。（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。）

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。

1.2 本研究の目的

1.1で述べたように、木材の質感をCGによりリアルに表現するための研究が、これまで多く行われてきた。しかし、樹種の特徴を人が明確に認識できる形で表現でき、なおかつ多様なバリエーションを表現可能な技術が見当たらない。木材製品のデザイン開発において、完成した段階での外観がより現実に近い形で表現でき、そのデザインの良し悪しを正しく評価できるようにするためには、現在工業製品の材料として一般的に用いられている樹種の特徴をリアルに表現できること、また3次元形状に整合した木目模様を正しく表現できることが重要である。本研究では、最終的にこれらの目標を実現することを目的としている。その過程において木材の樹種ごとの特徴表現に必要な、骨格構造の特徴表現、年輪パターンに含まれるゆらぎの特徴表現及びこれらの技術を市販のCGシステムと連携しながら簡単に活用できる実装システムの実現という過程を一つずつ解決していくことが具体的な研究目的である。

1.3 本論文の構成と要旨

本論文は、CGによる木材の質感表現技術を高度化するための手段として、これまで用いられていた直線骨格モデル法を改良した曲線骨格モデル法の提案と、自然の木材の年輪のゆらぎをモデル化しリアルに表現する手法の提案を対象としている。

第1章は序論で、本研究の背景となる国内の木材をめぐる環境、工業製品のデザイン開発にCGシステムが有効であることを紹介し、これまでのこの分野での技術開発の状況と本研究の基礎となる直線骨格モデル法の概要を解説するとともに、本研究の目的を明らかにする。

第2章では、これまでの直線骨格モデル法の問題点を解決するため、新たに開発した曲線骨格モデル法を用いた木材の質感表現技術により、これまでよりも滑らかで3次元的に完全に連続なソリッドテクスチャを生成する技術の詳細について述べる。

第3章では、木材の年輪形状に含まれる3種類のゆらぎ成分を分析し、これをモデル化し、新たに提案するゆらぎ生成関数を用いてCGによる木材の表現のリアリティーを向上させた技術の詳細について述べる。

第4章では開発した技術をより汎用的に活用できるようにするため、この技術を実装したテクスチャ生成システムを開発し、樹種の特徴表現に必要な年輪カラーパターンのリ

アリティを確認し、ゆらぎのパラメータの最適化方法を示す。また、実際に市販CGアプリケーションとの連携によりデザインシミュレーションへの応用が可能であることを実証した試験の概要を述べる。

第5章は結論で、第2章から第4章で述べた本研究の結果を要約し、本論文で得られた成果と今後の課題について総括する。

1.4 枝分かれを考慮した木目の表現手法

本論文で述べる研究内容は、桃井が開発した直線骨格モデル法がベースとなっている。そこで、直線骨格モデル法の概要について解説しておく。

直線骨格モデル法の概念を図1.2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、予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年毎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。

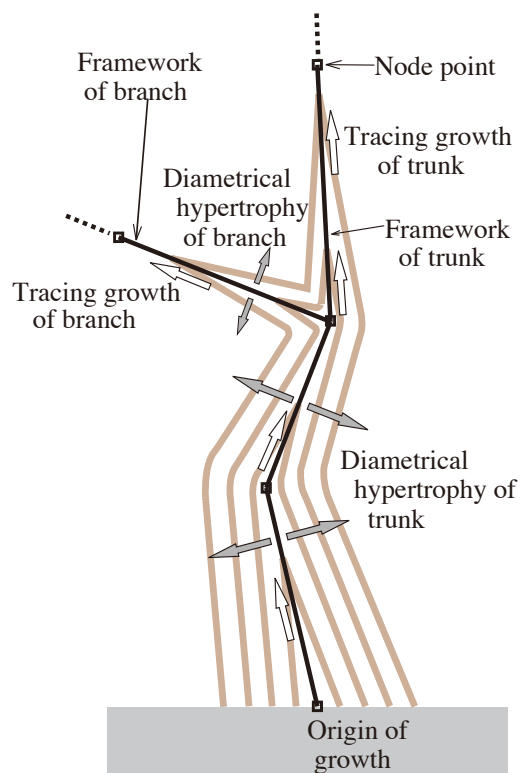


図1.2 直線骨格モデル法の概要

この仮想樹木の樹体内をテクスチャ空間として考え、任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」とよぶ）を求め、早材から晩材への変色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 1.3 (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、伸長成長及び肥大成長の距離を D_a, D_b 、伸長成長及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。

$$T_a = \frac{D_a}{v_a} \quad (1.1)$$

$$T_b = \frac{D_b}{v_b} \quad (1.2)$$

$$T = T_a + T_b \quad (1.3)$$

図1.3 (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。二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、影響する二つのセグメントを経由

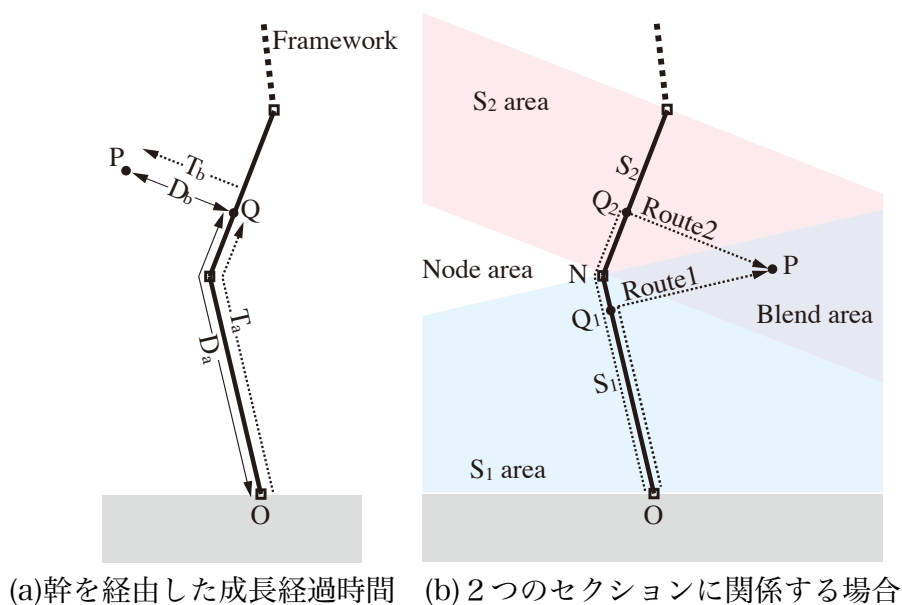


図1.3 直線骨格モデル法の成長経過時間計算

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[24]ことにより、統合的な成長経過時間を求める。

求めた成長経過時間から、その点が1年の間のどの季節にできた場所であるかを知ることができる。その季節にできた組織がどのような色をしているかを年輪のカラーパターンから参照することにより、その点の色を決定することができる。

仮想的な木材から切り出したある領域について、縦横に領域を走査して1点ずつ色を調べていくことにより、テクスチャ画像を生成することができる。

本論文では、この直線骨格モデル法を基礎として、この骨格モデルを改良し、新たなゆらぎモデルを導入することにより、これまでよりもリアルなCGによる木材の質感表現を実現した技術の詳細について、以下の章で述べる。

第 2 章

曲線骨格モデルを用いた 3 次元連続な 木目模様の生成

第2章 曲線骨格モデルを用いた3次元連続な木目模様の生成

2.1 緒言

直線骨格モデル法[24][25]には二つの大きな問題点があることが実験で明らかになった。一つ目の問題点は、骨格軸を構成するノード間の中央を通る平面上で、ある条件の時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。二つ目の問題点は、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。

本章では、従来の直線骨格モデル法の上記の二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。

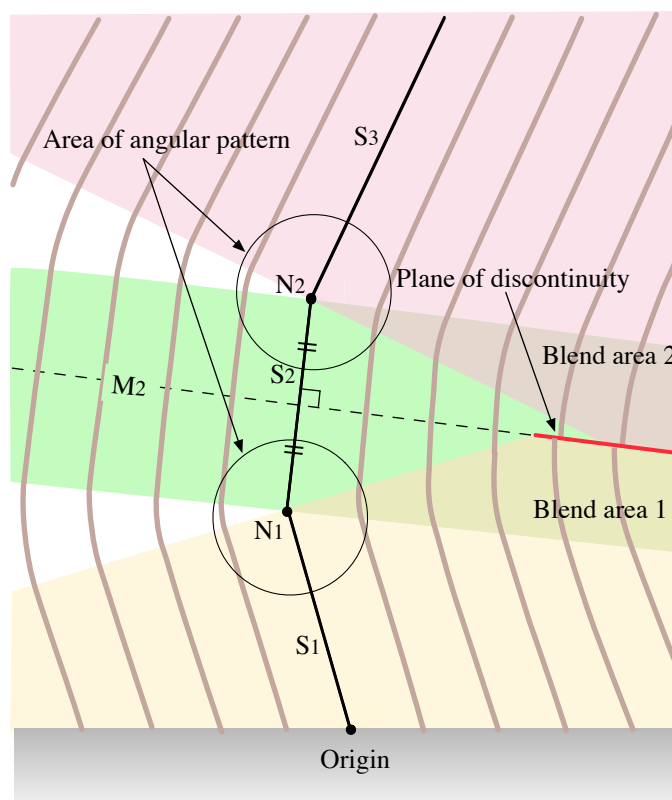


図2.1 不連続なテクスチャの発生原因

2.2 直線骨格モデルの問題点

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S1、S2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、S1を経由した成長経過時間とS2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2.1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二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S2の垂直二等分面M2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、模様が不連続となってしまう。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となってしまう。

もう一つの問題点は、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となってしまうことである。このような現象は、図2.1の円内の領域で顕著に現れる。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。

この二つの問題点は、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。

2.3 曲線骨格モデルの提案

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に伴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[24]。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一つである。

本法では、骨格軸がz正方向のみに成長すること並びに傾斜角度が大きくなならないという性質を利用して、各ノードにおけるC1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。

2.3.1 曲線骨格モデルの前提条件

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、骨格線分は概ねz軸に沿って定義される。

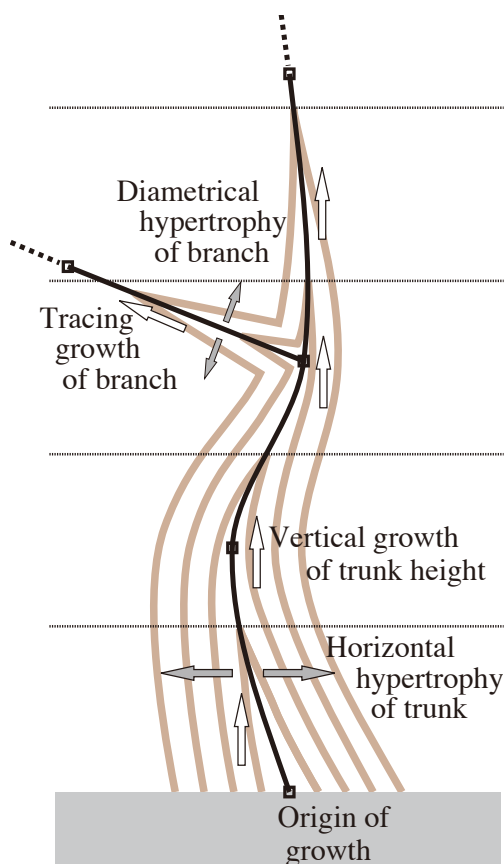


図2.2 曲線骨格を用いた樹木の成長モデル

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2.2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、C1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C1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。

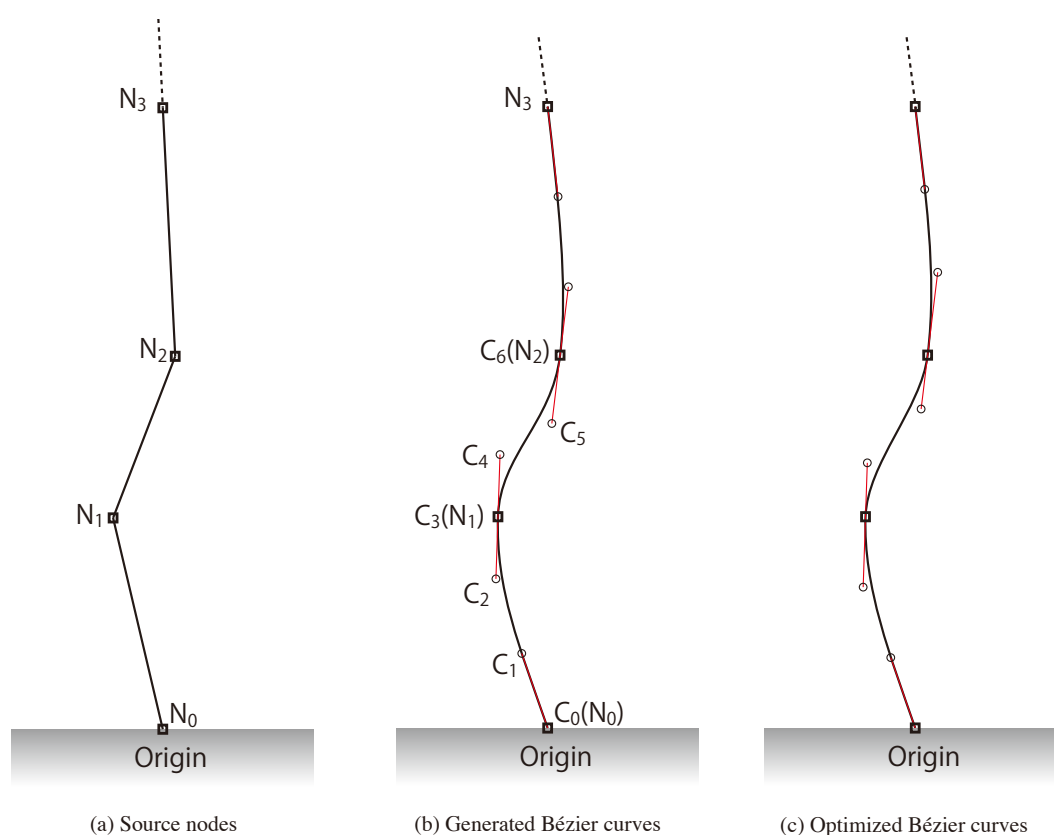


図2.3 ノード点群からの骨格曲線の自動生成と最適化

2.3.2 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 2.3 (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2.3(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(5)式により求めることができる[26].

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{12}(7C_0 + 6C_3 + C_6) \\ C_2 &= \frac{1}{6}(C_0 + 6C_3 - C_6) \\ C_4 &= \frac{1}{6}(-C_0 + 6C_3 + C_6) \\ C_5 &= \frac{1}{12}(-C_0 + 6C_3 + 7C_6) \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

この方法により求めたBézier曲線は、C2連続性を有している。

2.3.3 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[27]。この処理は計算が複雑で時間がかかる上、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。

この二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

ものと考えことにした。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。

2.3.4 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[28]。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。

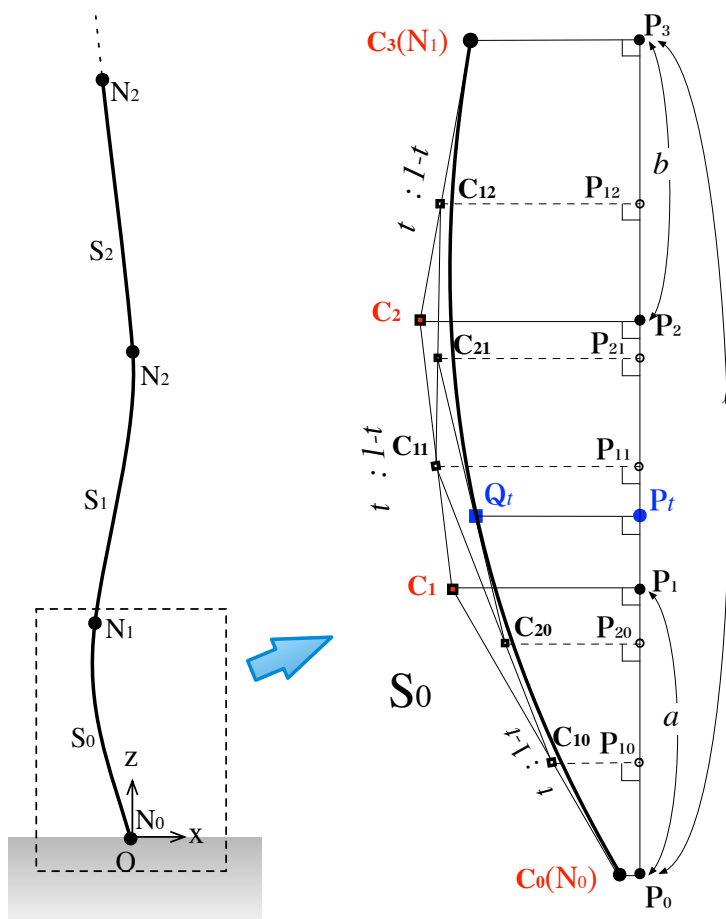


図2.4 骨格曲線の最適化

図2.4のようなテクスチャ空間内の任意の点 P_t の色を決定したいとき、 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予め行うことにした。

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。

$$|\overline{P_0 P_t}| = (-2\ell + 3a + 3b)t^3 + (3\ell - 6a - 3b)t^2 + 3at \quad (2.2)$$

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、

$$a = b = \frac{\ell}{3} \quad (2.3)$$

とすると、式(2.2)は、

$$|\overline{P_0 P_t}| = \ell t \quad (2.4)$$

$$t = \frac{|\overline{P_0 P_t}|}{\ell} \quad (2.5)$$

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(2.3)、(2.5)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、C2連続からC1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2.3(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2.3(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いことが確認できる。

2.3.5 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。

$$Q_t = t^3 C_3 + t^2(1-t)C_2 + t(1-t)^2 C_1 + (1-t)^3 C_0 \quad (2.6)$$

従って、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。

$$d = \sqrt{(x_P - x_Q)^2 + (y_P - y_Q)^2} \quad (2.7)$$

$$T_h = \frac{d}{v_h} \quad (2.8)$$

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。

$$T_e = \frac{z}{v_e} \quad (2.9)$$

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。

$$T = T_e + T_h \quad (2.10)$$

2.3.6 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繋がるよう処理を行う。図2.5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、幹だけを経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。

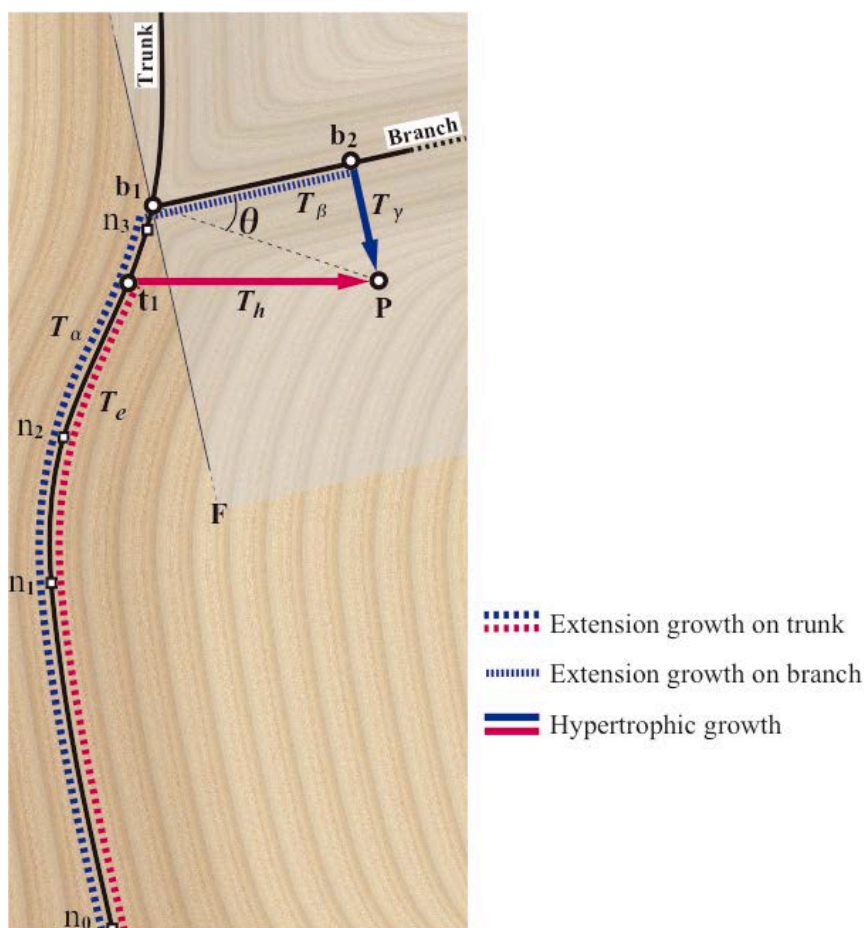


図2.5 枝がある場合の二つの成長経過時間のブレンド

また、幹から枝を経由して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b2として、成長原点からb1まで幹が伸長成長するのに要する時間 T_α 、b1からb2まで枝が伸長成長するのに要する時間 T_β 、及びb2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。この内、 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。

$$T_\beta = \frac{|\overline{\mathbf{b}_1 \mathbf{b}_2}|}{v_e} \quad (2.11)$$

ここではb1からb2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となってしまう。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。

$$\left. \begin{aligned} T_\gamma &= \left(\frac{1}{\cos \theta} \right) \frac{|\overline{\mathbf{b}_2 \mathbf{P}}|}{v_b} & \left(\theta \neq \frac{\pi}{2} \right) \\ T_\gamma &= \infty & \left(\theta = \frac{\pi}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

ここで、 θ は枝と線分が成す角度、 $|\overline{\mathbf{b}_2 \mathbf{P}}|$ はb2からPまでの距離、 v_b は枝の肥大成長速度を表す。従って T_1 と T_2 は、次の(2.13)、(2.14)式により求める。

$$T_1 = T_e + T_h \quad (2.13)$$

$$T_2 = T_\alpha + T_\beta + T_\gamma \quad (2.14)$$

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。

$$T = \frac{T_1 \cdot T_2}{\sqrt{T_1^2 + T_2^2}} \quad (2.15)$$

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 $T_1=T_2$ の時に、 $(1/\sqrt{2})T_1$ となる。

2.3.7 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2.6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。効果をわかりやすくするため、不規則化処理は行っていない。

図2.6-(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わかる(四角内)。

図2.7-(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達成されていることが確認できた。

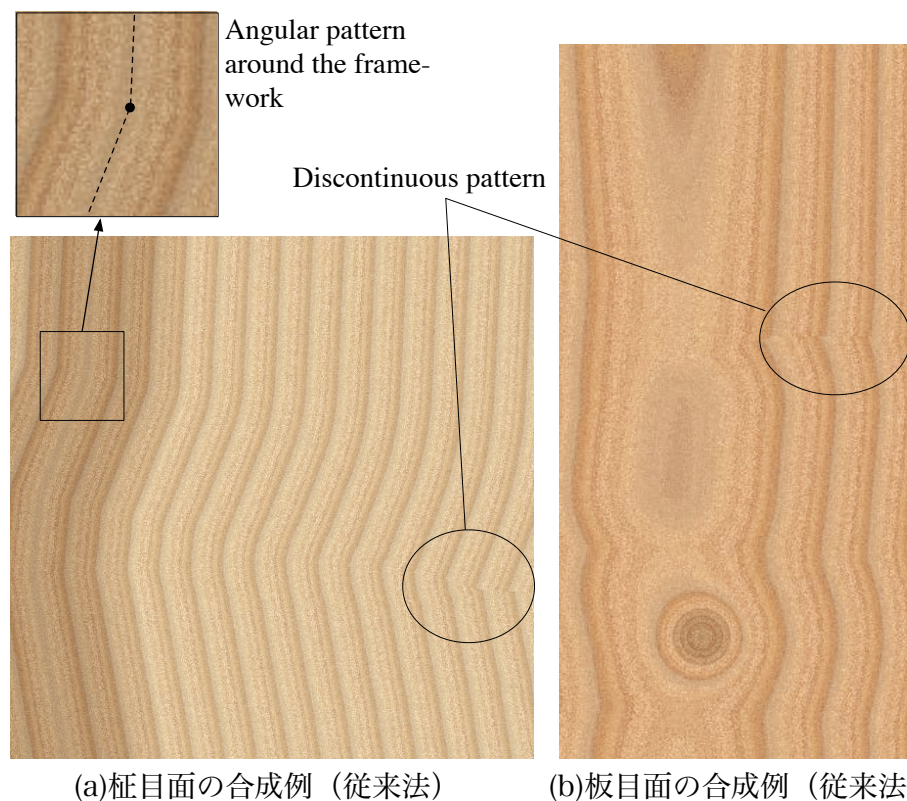


図2.6 従来法による画像合成例



(a) 柾目面の合成例（提案法）

(b) 板目面の合成例（提案法）

図2.7 提案法による画像合成例

図2.8(a), (b)は，提案法により枝の周辺の柾目及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．

従来の方法では，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，提案手法により全てのテクスチャ空間で模様の3次元連続性が実現できた．これにより，全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．



(a) 枝周辺の柾目面（提案法）

(b) 枝周辺の板目面（提案法）

図2.8 提案法による枝周辺の画像合成例

2.3.8 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(1.4GHz Core 2 Duo, 4GB Memory)である。実験では、10回の計測を行い、平均値を求めた。図2.9が比較実験の結果をグラフに表したものである。

このグラフからわかるように、曲線骨格モデル法は直線骨格モデル法よりも全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わかった。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

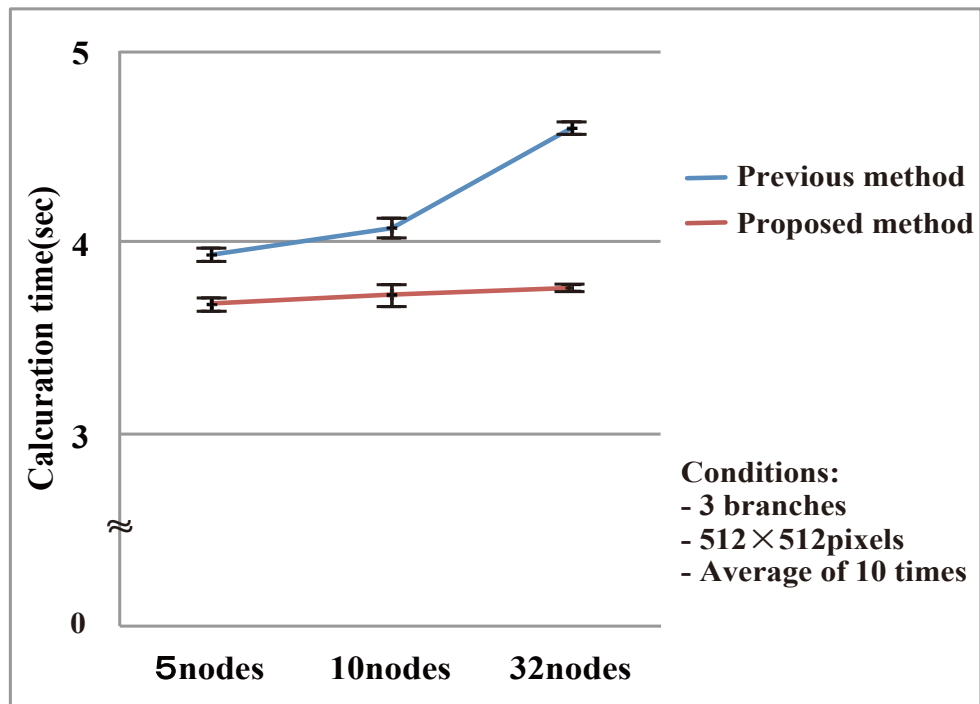


図2.9 処理時間の比較

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．

2.4 結言

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、処理時間も僅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。

第3章

年輪形状の自然なゆらぎ表現による リアリティの改善

第3章 年輪形状の自然なゆらぎ表現によるリアリティの改善

3.1 緒言

木材のテクスチャ合成を目的とした骨格モデル法は、年輪形状やパターンをパラメトリックにコントロールしながら、3次元的に整合性のある多様な木目模様を生成できるという長所を持っている。一方で、年輪形状のゆらぎが実際の樹木のものと異なっており、リアリティが足りないという課題が残されていた。

樹種の特徴を表現可能な木目模様表現技術を実現するためには、①木目の微細な質感と色の再現、②樹木の骨格構造との3次元整合性、③年輪形状に含まれるゆらぎのリアルな表現、の3点が重要と考えられる。骨格モデル法では、既に①、②が実現されており、③が可能になれば、その用途が大きく拡大する。

自然現象のほとんどのものは、予測できない不規則な変化を有しており、これは「ゆらぎ」と呼ばれている [29]。またゆらぎが人の感性に及ぼす影響についての研究[30-32]も行われている。木材の年輪形状にもゆらぎが含まれており、CGでは、このゆらぎをリアルに表現できることが木目模様のリアリティの向上に欠かせない。

本章では、自然の樹木の年輪形状に見られるゆらぎの発生を数学的手続きによりシミュレーションする手法を提案する。この手法は、屋内空間や家具など、マクロ的なスケールおよび視点位置で観測される年輪形状のゆらぎを、①骨格形状のゆらぎ、②年輪間隔のゆらぎ、及び③垂直断面の円周方向の年輪形状のゆらぎの三要素で表現することを特徴とする。この手法を骨格モデル法に組み入れることにより、これまでよりもリアリティの高い木目模様の生成を試みた。

この手法を用いて、実際に合成した画像を従来の手法によるものと感性的に比較する試験を行い、これまでよりもリアリティが向上していることを確認することができた。

3.2 これまでの年輪ゆらぎ表現技術

3.2.1 これまでの木目模様生成技術とゆらぎ表現

従来の骨格モデル法[24],[25],[33]の中で用いられているゆらぎの付加方法は、直交座標系の各軸方向へのゆらぎ値の加算による方法である。この方法は、ゆらぎの方向が樹木の組織構造と整合性がないため、リアリティが足りない。

岡田らは、空間内を格子状に分割し乱数によりスカラー値を与え、中点変位法により3次元的に連続で複雑なゆらぎ空間を生成する手法を示した[34]。各格子点を持つ単一のスカラー値を、中心軸からの年輪半径に乗算することにより、ゆらぎを含んだ年輪形状を生成し

ている。この方法では、半径が変化するとランダムなゆらぎ値が生成されるため、内側の年輪と外側の年輪の形状に相似性が得られず、不自然なゆらぎになってしまう。

佐々木が提案した手法[20]は、自然の樹木の木口面の画像を用いているため、ゆらぎをあらかじめ含んだテクスチャとなるが、骨格軸の曲がりを変現できず、ゆらぎの度合いを変えることができない。

青山らは、木目模様の微細組織の表現において、仮道管にゆらぎを与える方法として、円筒座標系の高さと偏角によるゆらぎ関数を用いている[35]。この方法では変位量を径に応じ変化させていないため、中心軸付近の変位が相対的に大きくなり、不自然なものになってしまう。この手法ではまた、年輪間隔を樹木の毎年の成長断面積が一定であるという性質から、緩やかに変化させているが、年輪間隔の不規則化については、考慮されていない。

河合は、樹木のミクロな繊維組織の偏角方向での変化をモデル化し、微細な木理から生じる異方性反射の表現を実現した[22]。この研究ではマクロ的な視点での年輪間隔の変化や円周方向での半径のゆらぎは導入されていない。

これまで報告された木目模様表現技術では、規則性の高いパターンの不自然さを解消する手段として感覚的にゆらぎを付加するに留まっている。さまざまな樹種の特徴を表現し分けるためには、自然の樹木の計測に基づく、樹木の成長過程と整合する統合的なゆらぎ発生モデルが求められる。

武者は、木材の木目模様についても、 $1/f$ ゆらぎが含まれていると述べている[29]。また、この中で、木材の年輪形状のゆらぎが円周方向の年輪形状のゆらぎと年輪間隔のゆらぎにより表現できる可能性を示している。しかし、木目模様が構造的にどの程度 $1/f$ ゆらぎを持っているのかは、明らかでない。

本研究では、木材の質感をリアルに表現するために、実際の木材の年輪形状を解析し、その特徴を数式で再現することを試みた。

3.2.2 ゆらぎの数式表現

年輪形状にリアルなゆらぎを与えるためには、元となる自然なゆらぎ値を数式（手続き）で発生させなければならない。特定のスペクトルを持つゆらぎを数式により発生させる手法としては、これまでに①乱数による中点変位法[34]、②Perlinノイズ法[15]、③逆FFT法[15]、④周波数の異なる複数の正弦波(cosを含め、便宜上以下「正弦波」と呼ぶ)を多重化する方法[36],[37]の4種類が主に用いられている。いずれも $1/f$ ゆらぎの特徴を再現できるよう考慮されている。①から③の方法は、空間領域に対応する大きな配列にあらかじめゆらぎ値を用意する必要があり、広大な空間内でその都度この計算を行うことになり、非効率的である。④の方法は、その都度正弦波成分を直接合計するだけでゆらぎ値を決定できる。

これまでの骨格モデル法では、上記④の方法を用いている。具体的には、次の(3.1)式の周波数の異なる複数の正弦波を合成したゆらぎ関数を用いて直交座標系で各軸方向に位置をシフトさせている。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} z - 0.5(x+y) + \delta_x \\ z - 0.5(x+y) + \delta_y \\ x + y + z + \delta_z \end{bmatrix} \\ \mathbf{Y} &= \sum_{i=0}^n I_i \cdot \cos(\mathbf{T} \cdot \mathbf{f}_i) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

ここで、 \mathbf{Y} ：座標のシフト値、 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ ：位相調整パラメータ、 \mathbf{f}_i ：周波数調整パラメータ、 I_i ：ゆらぎ強さ調整パラメータを表す。

この方法では、xy平面と平行な断面では、樹木の組織構造と無関係な斜め方向にゆらぎが向いてしまう。また各軸方向へゆらぎを与えているため、樹木の成長過程との整合性が得られず、不自然なゆらぎとなってしまう。

新たに提案するゆらぎ生成手法では、これまでの手法の問題点を解消し、よりリアルなゆらぎを生成できることを目標とした。

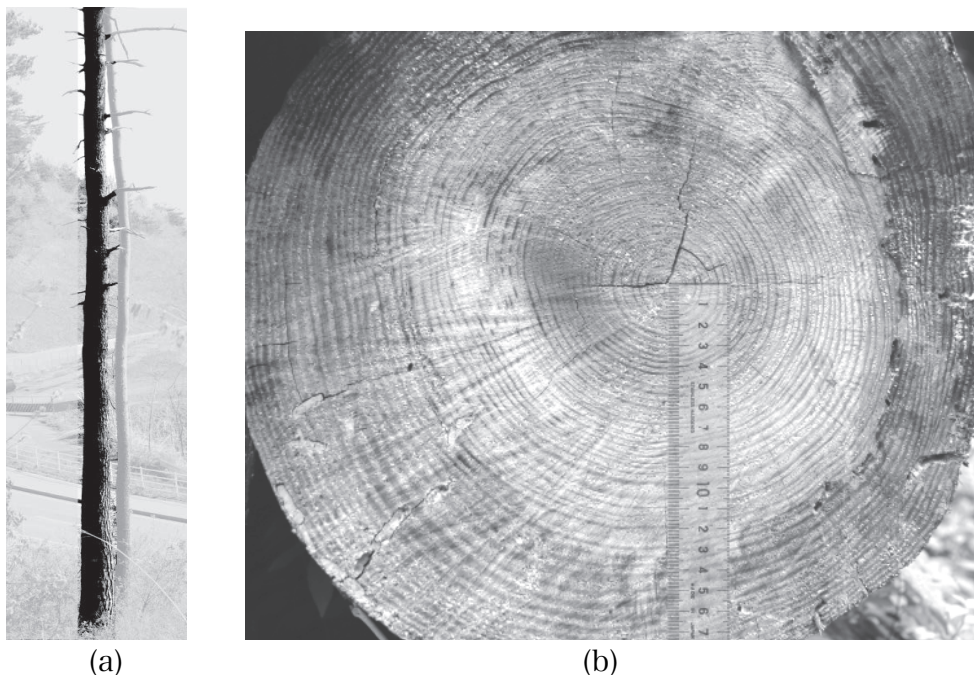


図3.1 樹体の計測を行ったアカマツの樹(a)と年輪形状の計測を行ったアカマツ材(b)

3.3 実際の樹木の年輪解析

年輪ゆらぎモデル構築のため、実際の樹木の形状と年輪パターンの形状を計測し、分析を行った。今回計測に用いた樹種は、アカマツである。アカマツは国内での生産量が比較的多く、建築用の材料として需要が高い針葉樹である。基本三方向のうち、軸方向は、曲がり少なく建築用材に適した図3.1(a)に示す伐採前の樹木から計測した。年輪間隔及び円周方向の形状は図3.1(b)に示す伐採された樹木の垂直断面から計測した。計測結果から、年輪形状に含まれるゆらぎを解析した。

3.3.1 樹体軸の曲がり

年輪形状の軸方向での変化を計測するためには、理想的には中心軸に沿って樹木の断面を観察できればよいが、自然の樹木から正確に中心軸を通る断面を得ることは困難である。そこで簡易な方法として、樹木の太さのほぼ中心を骨格軸が通っていると仮定し、樹木の外形を写真撮影して、画像から中心軸形状と太さの変化を計測した。計測した樹木は、推定樹齢約50年、根本から30cmの高さでの直径は約60cm、高さ方向の計測範囲は地上30cm～12m40cmの範囲で、10cm間隔で直径及び中心軸の位置を計測した。写真の撮影は樹木から約100mの距離から望遠レンズで行った。写真の1画素は実寸の約2mmに相当する。

この計測結果を図3.2に示す。太さの変化については、樹皮面の凹凸が誤差として含まれていることや枝の部分の膨らみ等も含まれていることなどを考慮すると、根元から先端に向かって徐々に細くなる全体的な変化の他は、ほとんど一定であることがわかった。従って、マクロ的には縦方向の太さのゆらぎは考慮する必要がないと判断した。加工された木材の柁目面を観察しても、15cm程度の範囲では、ほぼ一定で変化が見られなかった。

アカマツと同様に幹の直線性が高い針葉樹材では、垂直方向での年輪間隔のゆらぎは、円周方向のゆらぎや年輪間隔のゆらぎに比べると、無視しても問題ないレベルと考えられる。

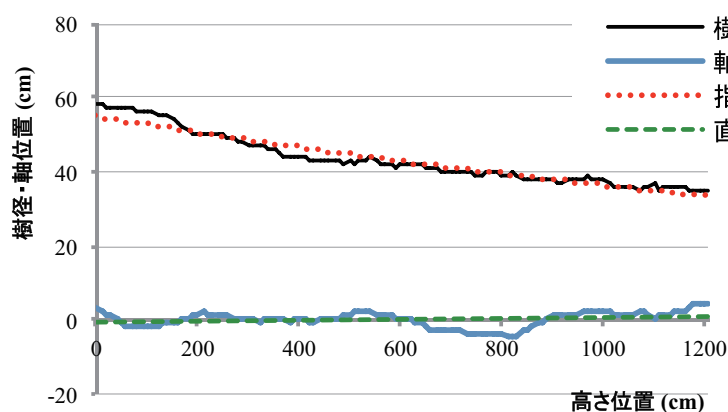


図3.2 樹体の曲りと樹径の計測結果

樹木の根本から先端に向かって径がゆるやかに細くなる傾向は、骨格モデル法では既に樹高による肥大成長速度の変化として表現可能であるので、ここでは考慮しないことにする。

それよりも大きな要素と考えられるのは、骨格軸の曲がりである。この骨格軸のゆらぎは相対的に低周波であるため、骨格軸の形状定義により表現可能であり、あらためてゆらぎを付加する必要性は少ないと判断した。

3.3.2 年輪間隔のゆらぎ

自然の樹木の年輪間隔のゆらぎを調べるため、中心軸から半径方向に年輪間隔を計測した。年輪間隔は年輪の色が最も顕著に変化する晩材の外側を基準に計測した。樹齢と年輪間隔の関係をグラフにした結果が、図3.3である。1年毎に年輪間隔が大きく変化していることが確認された。

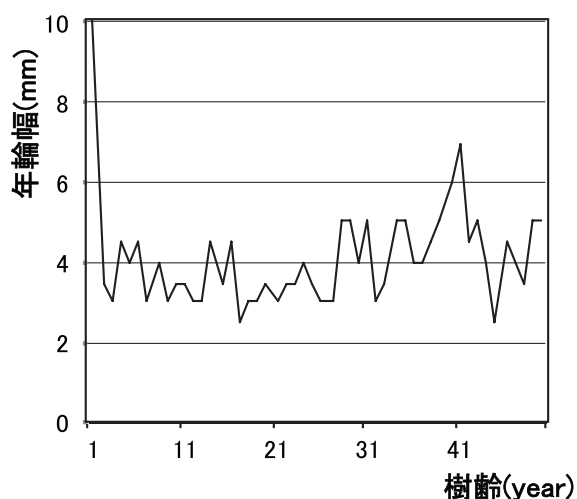


図3.3 年輪間隔の計測結果

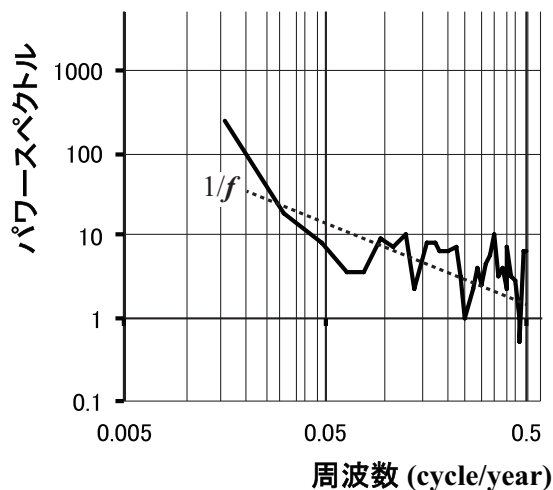


図3.4 年輪間隔の FFT分析結果

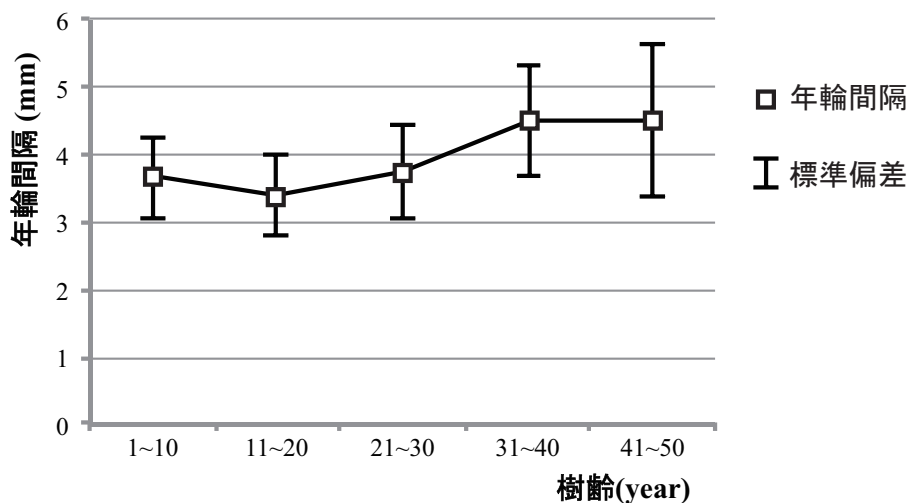


図3.5 年輪間隔とその変動率の樹齢による変化

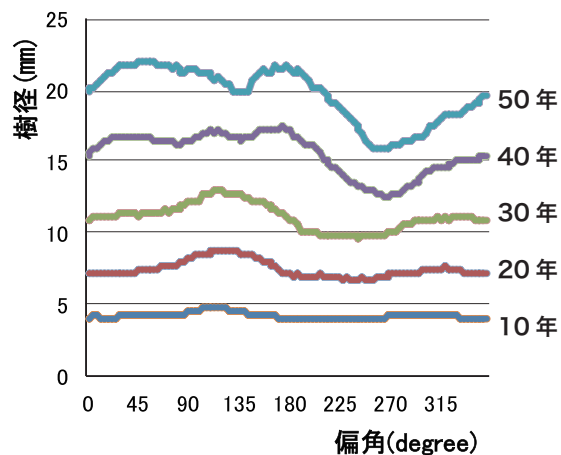


図3.6 円周方向年輪径の計測結果

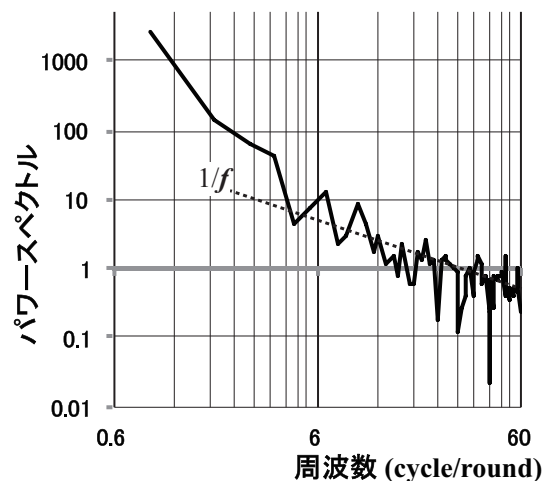


図3.7 円周方向年輪径のFFT分析結果

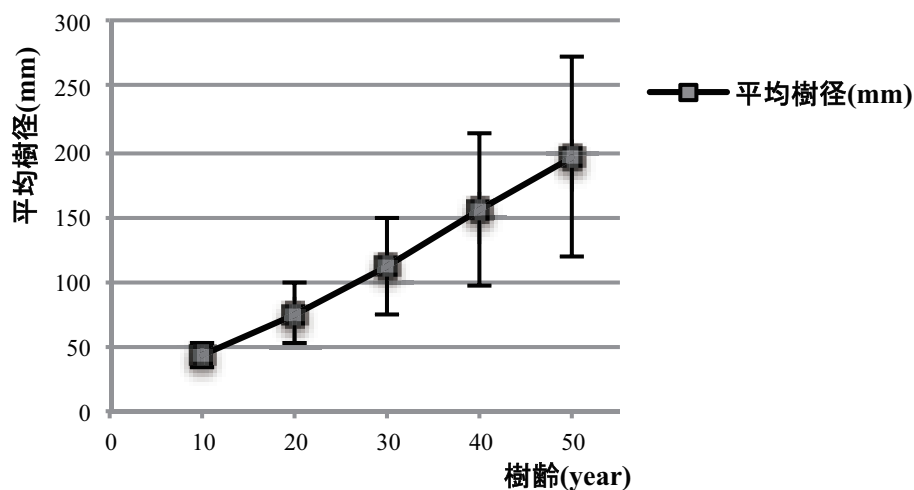


図3.8 樹齢と樹径及び標準偏差の関係

また、年輪間隔のゆらぎをFFTで分析してみたところ、図3.4のように周波数が高くなるほどパワースペクトルが低くなる傾向が見られ、 $1/f$ ゆらぎの特徴を示していた。

10年ごとの変動の標準偏差を調べてみたところ、図3.5のように年輪間隔、変動率ともに樹齢に関係なく概ね一定であった。通常、年輪間隔は樹齢とともに狭くなっていくことが知られている[10]が、今回のサンプル材ではそのような傾向は見られなかった。

3.3.3 円周方向のゆらぎ

円周方向のゆらぎを調べるために、10年の間隔で、基準方向から一定角度（ 3° ）ごとに中心軸から年輪までの距離を測定した。図3.6にその結果を示す。

計測結果をFFTにより分析したところ、図3.7のような結果が得られた。パワースペクトルは、 $1/f$ ゆらぎに近い特徴を示していた。

また図3.8に樹齢と樹径および樹径の標準偏差の関係を示す。この二つの図からわかるように、全体的には樹齢にかかわらず、ゆらぎの形状は内側と外側で似ており、樹齢が増えるほどゆらぎの量は増えていくことがわかった。これを変動率（標準偏差／平均値）として見ると、ほぼ一定であった。

円周方向の細かい形状を観察すると、樹齢とともにわずかながら変化していることがわかった。この特徴を表現するためには、円周方向の偏角を基にゆらぎを生成する関数を用意して、これに樹齢によってゆらぎの形状がわずかながら変化するような項を付加する必要がある。

3.4 年輪ゆらぎの発生モデルの提案

3.4.1 骨格モデル法の座標系

骨格モデル法では、xy平面を地面と考え、樹木は地面と垂直のz軸方向に成長する。骨格モデル法で定義される仮想樹木は、垂直方向へ伸長成長しながら、放射方向へ肥大成長して年輪を重ねていき、3次元空間に連続な年輪の層を形成していく。

このテクスチャ空間から、xy平面と平行な面でテクスチャを切り出すと木口面の模様となり、z軸と平行で骨格軸に近い面では柾目面の模様が、遠い面では板目面の模様が生成される。また骨格モデル法では、根元から先端に向かって細くなる形状表現や年輪間隔が樹齢とともに狭くなる形状表現が可能である。

3.4.2 ゆらぎの三要素

木材の年輪形状のゆらぎを観察した中で、これを数式で表現するためには少なくとも次の3つの要素を考慮する必要があることがわかった。

- (1) 高さ方向での中心軸の非直線性。
- (2) 気候や環境の変化による年輪の肥大成長速度の変動。
- (3) 樹木の中心軸から円周方向の肥大成長速度のばらつき。

そこで、年輪ゆらぎモデルでは、上記の3つの要素を次の3つのゆらぎ付加の手続きにより表現する。

- (I) 骨格モデル法における骨格軸の定義において、骨格ノードの位置を非直線的に配置して骨格軸にゆらぎを付加する。
- (II) 樹木の骨格軸からの距離を変数とする年輪間隔ゆらぎ関数によって求めたゆらぎ値を骨格軸からの距離に加算することにより年輪間隔にゆらぎを付加する。
- (III) 樹木の骨格軸に対する偏角を変数とする円周方向ゆらぎ関数によって求めたゆらぎ値に1を加えた値を、骨格軸からの距離に乗算することにより、年輪の円周方向の形状にゆらぎを付加する。

これら3要素のイメージを図3.9に示す。また、テクスチャ座標系とこれら一連のゆらぎ付加手続きの関係を図3.10に示す。

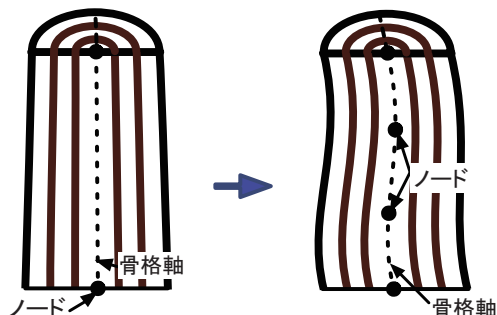
骨格軸の形状は、ユーザが骨格ノードの座標値を直接入力できるようにした。想定されるノード数は2～16個と少ないこと、また、実際の木材を計測して入力できるようにしたいと考えたためである。

テクスチャ空間内の任意の点 $P(x_p, y_p, z_p)$ について色を決定したいとき、 P にゆらぎを加えた点 P' を考える。ここで(Ⅱ)の手続きに用いる年輪間隔ゆらぎ関数を $f_{int}(r)$ 、(Ⅲ)の手続きに用いる円周方向ゆらぎ関数を $f_{cir}(\theta)$ と表すことにする。 r は骨格軸からの距離、 θ は円周方向の偏角を表す。

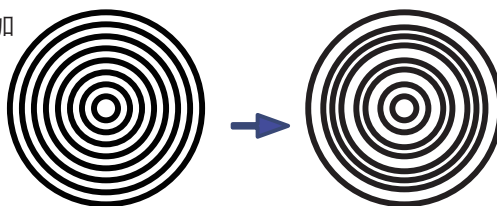
また、 P を通り xy 平面と平行な面上で骨格軸と交差する点 $P_{ax}(x_{ax}, y_{ax}, z_p)$ を原点とする座標系を置く。

$$\begin{bmatrix} \tilde{x}_p \\ \tilde{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{ax} \\ y_{ax} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

(Ⅰ) 骨格軸へのゆらぎ付加



(Ⅱ) 年輪間隔へのゆらぎ付加



(Ⅲ) 円周形状へのゆらぎ付加

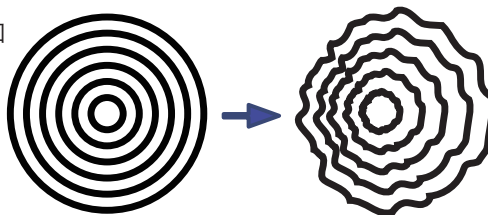


図3.9 年輪ゆらぎモデルにおけるゆらぎの三要素

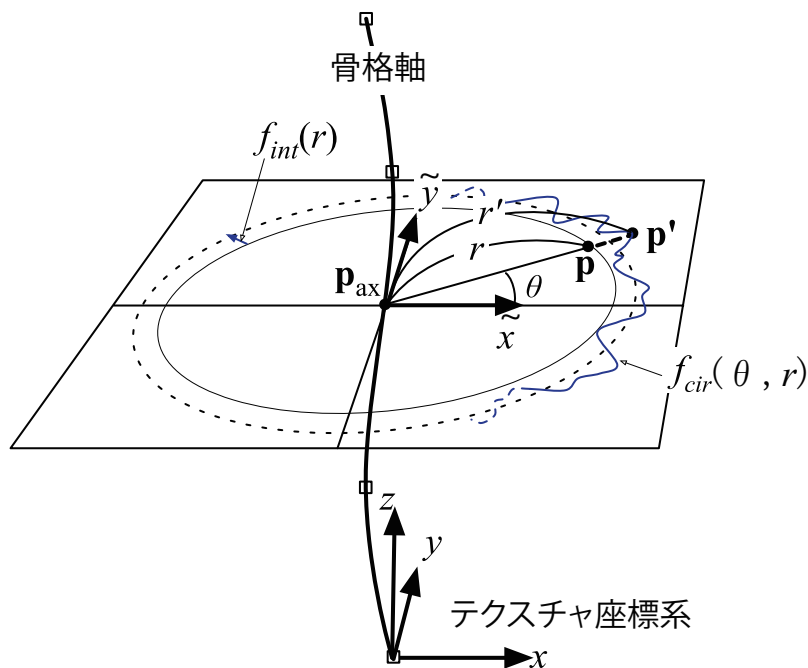


図3.10 テクスチャ座標系とゆらぎ付加手続きの関係

P_{ax} を原点とする円座標系を考え、 P の座標が (r, θ) のとき、 P' の座標が (r', θ) とすると、 r' は次式で求める。

$$r = \sqrt{\tilde{x}_p^2 + \tilde{y}_p^2} \quad (3.3)$$

$$r' = (r + f_{int}(r))(1 + f_{cir}(\theta, r)) \quad (3.4)$$

この距離 r' から、骨格モデル法による成長経過時間を求めて色を決定することにより、年輪形状にゆらぎを付加することができる。

3.5 ゆらぎ関数の提案

3.5.1 ゆらぎ関数の条件

年輪間隔ゆらぎおよび円周方向ゆらぎの生成に用いるゆらぎ関数には次のような性質が求められる。

- (1) $1/f$ ゆらぎの特徴を表現できること。
- (2) 3次元連続であること。特に円周方向のゆらぎが全周に渡って連続に変化すること。
- (3) 周波数やゆらぎ量をコントロールでき、多様なゆらぎ形状を生成できること。

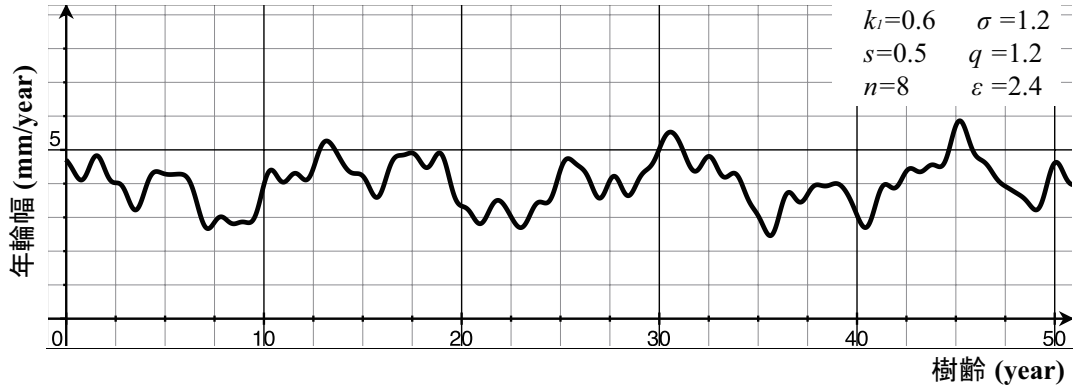


図3.11 年輪間隔ゆらぎ関数の例

(4) 任意の点の座標値を元に，その点におけるゆらぎ量を一意に計算できること．

Gardnerは，異なる周波数・振幅・位相の正弦波成分関数を5個程度組み合わせるだけで，雲など十分複雑で自然に見えるテクスチャが生成できることを示した[36,37]．この方法は，ゆらぎの最大値や複雑さおよび連続性といった形状のコントロールがしやすいというメリットがあり，上記の条件を満たしている．この方法をベースに，年輪間隔ゆらぎおよび円周方向ゆらぎのそれぞれに適したゆらぎ関数を考案した．

3.5.2 年輪間隔ゆらぎ関数

計測の結果をもとに，年輪間隔ゆらぎ関数は次式のように決定した．

$$f_{\text{int}}(r) = q \cdot v_b \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{i^{\sigma}} \cdot \cos \left(\left(s(i-1) + \frac{r}{\varepsilon} \right) i^{\sigma} \right) \quad (3.5)$$

ここで， q ：ゆらぎの影響度調節パラメータ， v_b ：肥大成長速度， k_i ：各正弦波の強度を調節する係数， s ：それぞれの正弦波の位相調整用パラメータ， r ：骨格軸からの距離， ε ：ゆらぎ関数の周期調節パラメータ， σ ：各正弦波の周波数倍率調整用パラメータを表す．

この式は， $1/f$ の強度比率で複数の正弦波を合成したものである．位相調整用パラメータ s の値を変えると，それぞれの正弦波の位相がずれることにより，異なる波形のゆらぎを生成することができ，ゆらぎ関数の細かい形状にバリエーションを付けることができる． k_i は，通常1で， k_1 のみ異なる値を設定した．

この式により生成したゆらぎ波形の例を図3.11に示す．この例では，肥大成長速度を実測値の4.0mm/yearに設定している．このシミュレーション例を実測値と比較してみると，平均値と標準偏差がほぼ一致する．またFFTによりスペクトル分析を行った結果，図3.12のよ

うな結果が得られた。このグラフからこの関数が1/fゆらぎを再現でき、またグラフの概形も実測値のものと非常に似ていることが確認できる。

3.5.3 円周方向ゆらぎ関数

図3.10において、円周方向ゆらぎの付加は、骨格軸を中心とする円周上の偏角 θ と距離 r をパラメータとする円周方向ゆらぎ関数から生成したゆらぎ値を、骨格軸からの距離に加算することにより実現する。

テクスチャ空間内の任意の点Pの偏角 θ は、座標値から次式により求めることができる。

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y_p - y_{ax}}{x_p - x_{ax}}\right) & (x_p - x_{ax} > 0, y_p - y_{ax} > 0) \\ \frac{\pi}{2} & (x_p - x_{ax} = 0, y_p - y_{ax} > 0) \\ \pi + \arctan\left(\frac{y_p - y_{ax}}{x_p - x_{ax}}\right) & (x_p - x_{ax} < 0) \\ \frac{3\pi}{2} & (x_p - x_{ax} = 0, y_p - y_{ax} < 0) \\ 2\pi + \arctan\left(\frac{y_p - y_{ax}}{x_p - x_{ax}}\right) & (x_p - x_{ax} > 0, y_p - y_{ax} < 0) \end{cases} \quad (3.6)$$

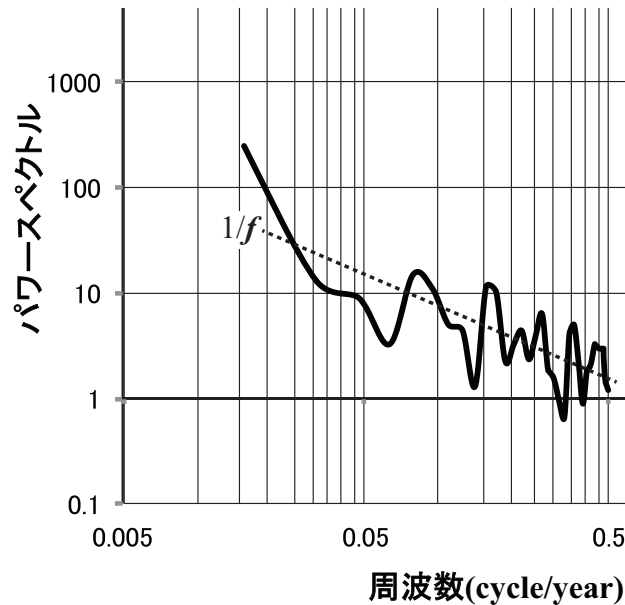


図3.12 合成ゆらぎを付加した年輪間隔のFFT分析結果

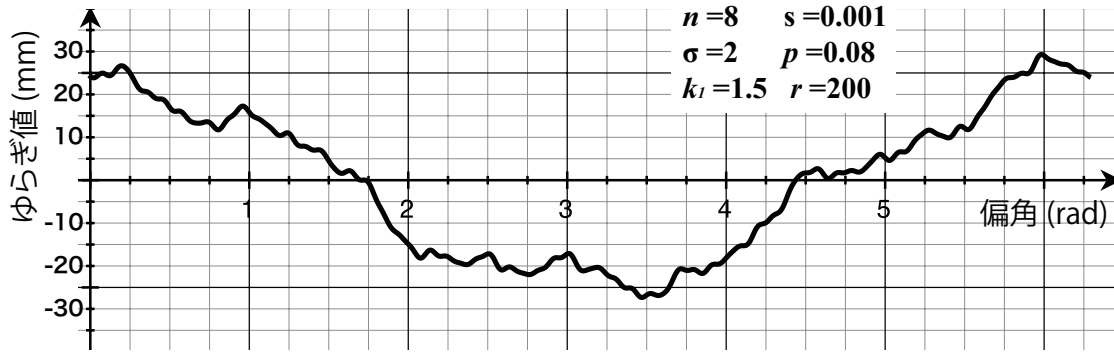


図3.13 円周方向ゆらぎ関数の波形例

ここで、 (x_{ax}, y_{ax}, z_{ax}) は点 P_{ax} の座標値， (x_p, y_p, z_p) は点 P の座標値を表す。

円周方向ゆらぎ関数は，次式を用いた。

$$f_{cir}(\theta, r) = p \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{i^\sigma} \cdot \cos((s \cdot r(i-1) + \theta) i^\sigma) \quad (3.7)$$

ここで， p ：円周方向ゆらぎ量調整用パラメータを表す。

σ を整数にすれば，このゆらぎ関数は $0 \leq t < 2\pi$ の区間の繰り返しとなる。そのため，全周においてゆらぎ値の連続性が保たれる。

k_1 の値は，自然の樹木に見られる，方角によって年輪の密度が大きく異なる現象に類似したゆらぎを調節するのに用いる。 $k_2 \sim k_n$ は，通常1である。

また，位相調整用パラメータ s の値を変えると，それぞれの正弦波の位相がずれることにより，異なる波形のゆらぎを生成することができ，ゆらぎ関数の細かい形状にバリエーションを付けることができる。

(3.7)式を用いて生成した円周方向ゆらぎの波形の例を図3.13に示す。

3.6 レンダリング実験

本手法の効果を確認するため，レンダリング実験を行った。図3.14には，年輪間隔にゆらぎを付加した年輪形状の合成例を示す。それぞれ，(a)年輪間隔のゆらぎを付加しない場合，(b) $q=0.3$ でゆらぎを付加した場合，(c) $q=0.5$ でゆらぎを付加した場合の画像である。 q の値を更に大きくすると，成長経過時間に逆進が発生し，不自然な形状となってしまう。

図3.15は，円周方向にゆらぎを付加した年輪形状の合成例を示す。それぞれ，(a)ゆらぎを付加しない場合，(b) $p=0.08$ で付加した場合，(c) $p=0.12$ で付加した場合の合成例である。

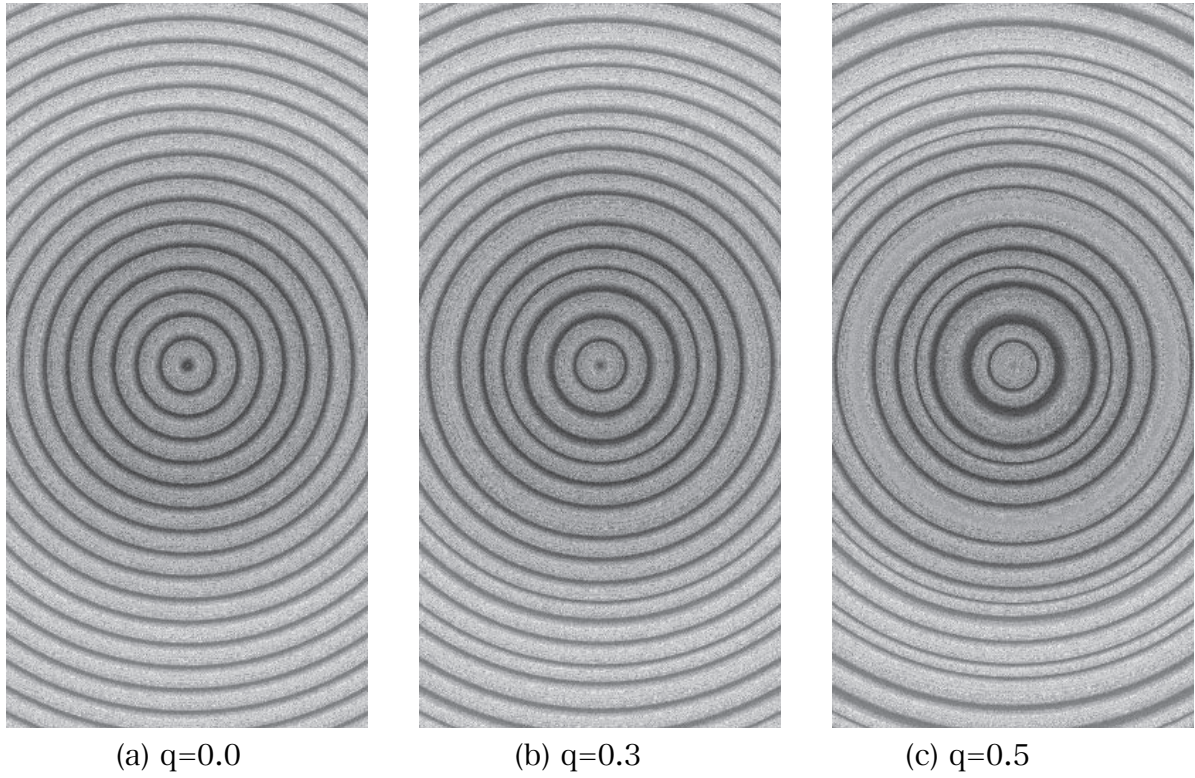


図3.14 間隔にゆらぎを付与した木口面の年輪合成例

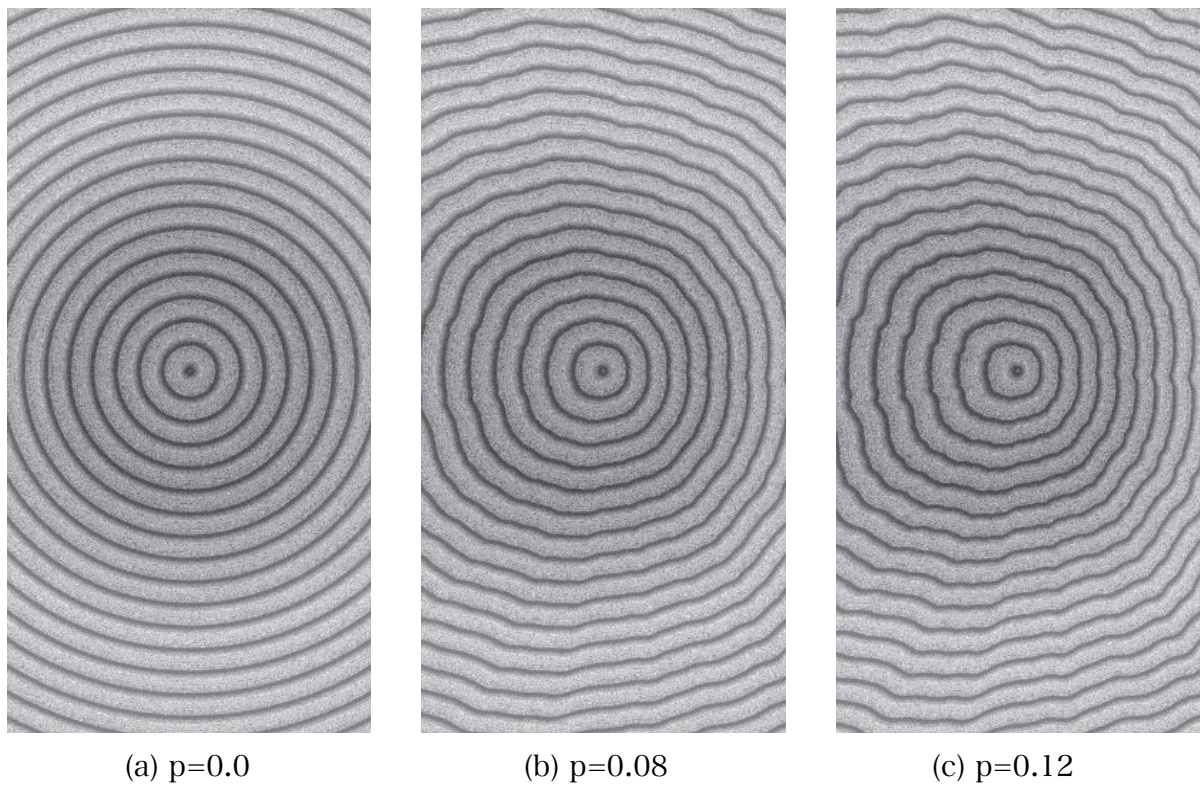
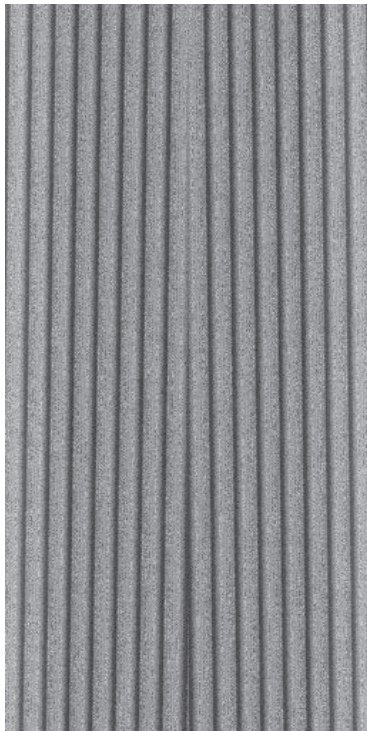
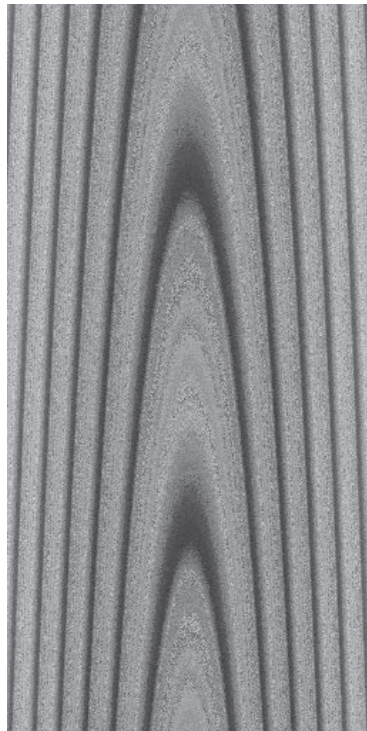


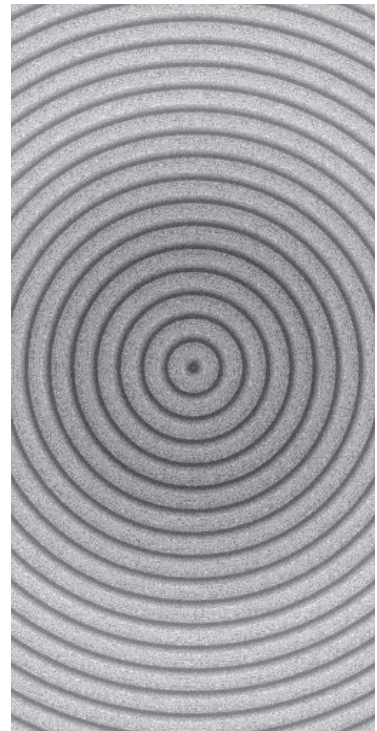
図3.15 円周方向のゆらぎを付与した木口面の年輪合成例



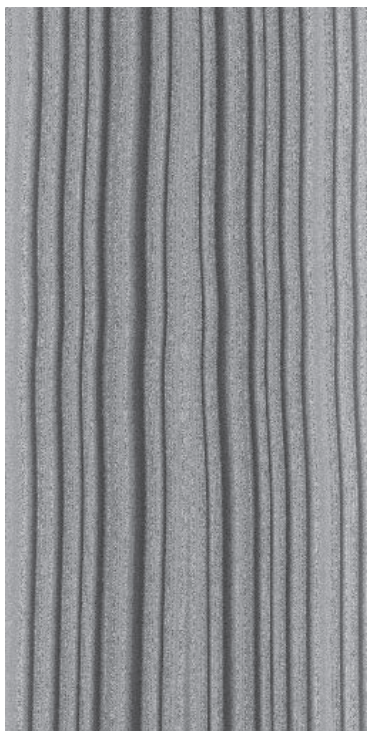
(a) ゆらぎなし柁目面



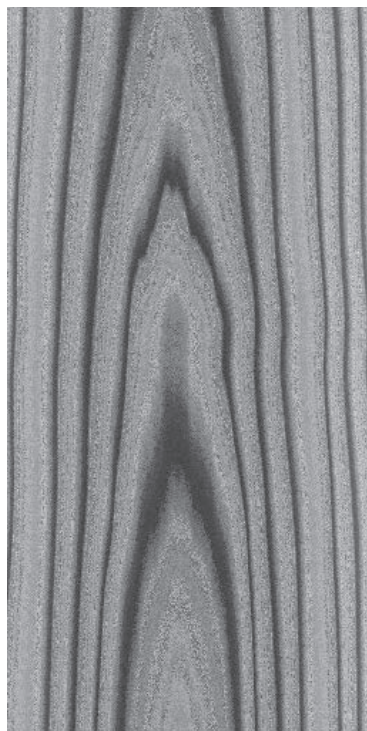
(b) ゆらぎなし板目面



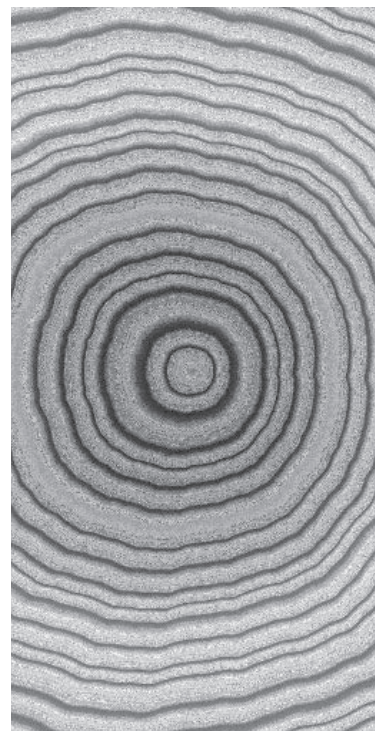
(c) ゆらぎなし木口面



(d) ゆらぎあり柁目面



(e) ゆらぎあり板目面



(f) ゆらぎあり木口面

図3.16 提案法によるゆらぎの効果の比較画像

図3.16は、ゆらぎがない場合と全てのゆらぎを付加した場合の比較画像である。(a)はゆらぎなしの柾目面、(b)はゆらぎなしの板目面、(c)はゆらぎなしの木口面である。(d)～(f)は、それぞれ柾目面、板目面、木口面のパターンの合成例である。骨格軸のゆらぎレベルには、自然の樹木の計測値によるゆらぎを与えた。また、年輪間隔、円周方向のゆらぎのレベルおよび各パラメータの値は、試行錯誤を繰り返し、FFT分析結果が実測のものに近くなるよう設定した。ゆらぎがない合成例に比べ、ゆらぎを付加した合成例は非常にリアルな形状が生成されている。(年輪間隔： $q=0.5$, $k=0.6$, $2 \leq i \leq 8$, $\sigma=1.2$, $s=0.5$, $\varepsilon=2.4$, 円周方向： $p=0.08$, $k=1.5$, $2 \leq i \leq 8$, $\sigma=2.0$, $s=0.001$ に設定。以下「標準値」という。)

図3.17は、枝がある骨格形状の場合の画像合成例である。(a)はゆらぎなし、(b)は提案法によるゆらぎを与え、(c)は骨格モデル法で従来から用いられている直交座標系へのゆらぎ付加による合成例である。従来法のゆらぎ量の調整は、同じ条件が設定できないため、提案法の本口面でのゆらぎが感覚的に同じレベルになるように調節した。

提案法では、全体に適度なゆらぎが表現されており、枝による節の部分も違和感がない。それに対し従来法では、骨格構造とゆらぎの整合性がないため、節の部分の形状が変形してしまい、不自然に感じられる。また、板目面でのゆらぎが非常に大きくなってしまい、ゆらぎの形状に斜めの方向性が出てしまっている。

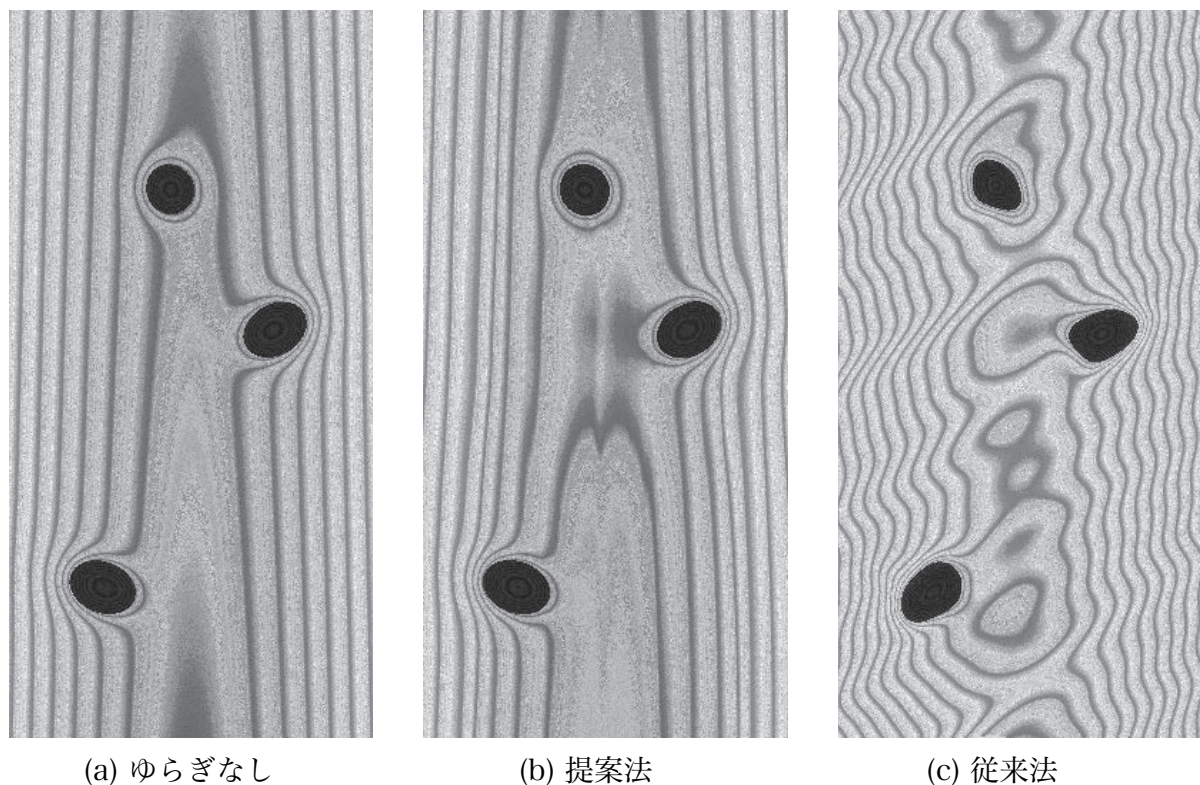


図3.17 枝がある場合の従来法との比較

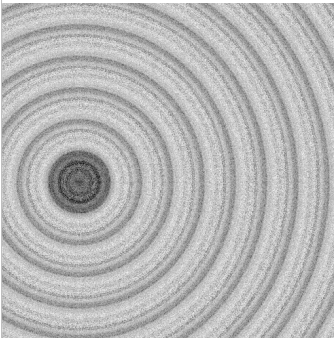
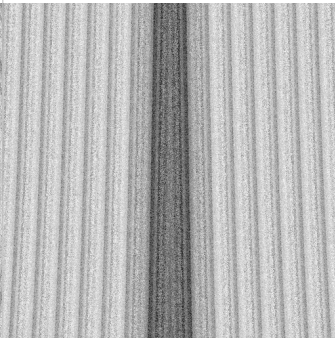
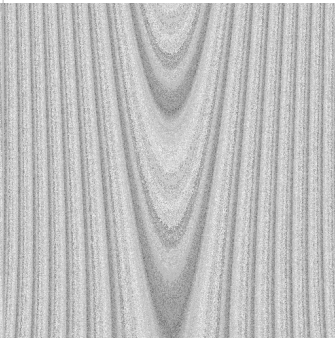
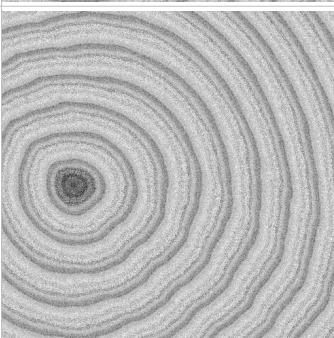
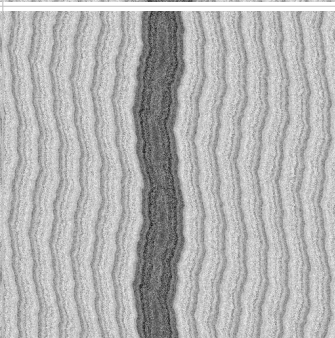
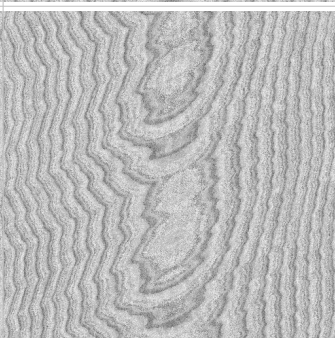
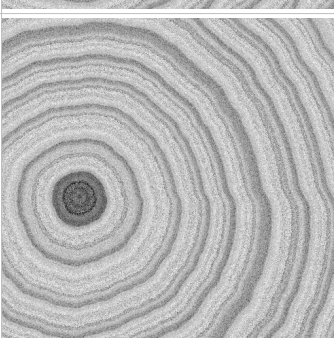
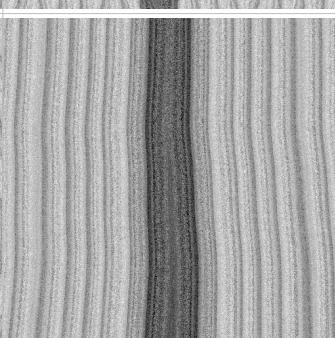
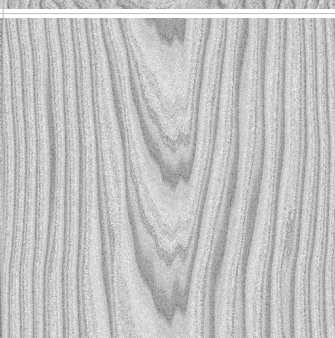
3.7 リアリティの評価

本手法で合成した年輪形状がどの程度リアルに見えるのかを調べるため、学生の被験者による評価実験を行った。

3.7.1 評価実験の方法

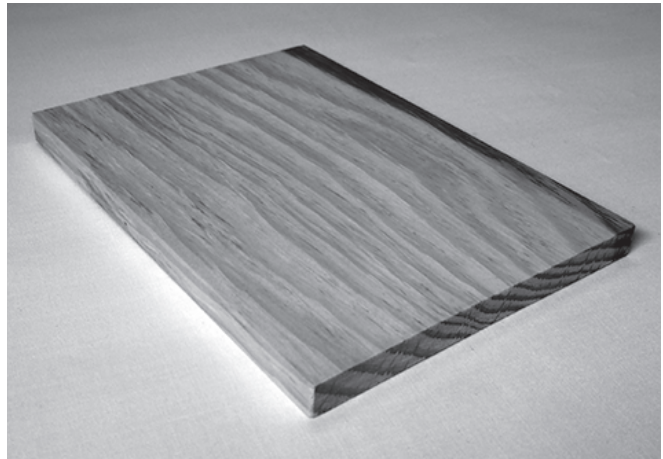
評価実験には、(a)ゆらぎなし、(b)従来法、(c)提案法の3種類の画像生成方法により合成した木目テクスチャ画像を用意し、3通りの組み合わせに対して、シェッフェの対比較法（中屋の変法）[38]によりリアリティを評価させた。木材の基本3断面ごとに効果を比較するため、木口面、板目面、柾目面それぞれの条件で、比較を行った。また、この3種類の条件で作成した画像をセットで提示した場合の評価を最後に行った。実験に用いた合成画像の一覧を表3.1に示す。被験者は、男女5名ずつ、合計10名の19～20歳の学生である。

表3.1 感性評価に用いた合成画像

| | 木口面 | 中心柾目面 | 板目面 |
|--------------|---|--|---|
| (a) ゆらぎなし |  |  |  |
| (b) 従来法 |  |  |  |
| (c) 提案法 |  |  |  |



(a)



(b)

図3.18 感性評価の際に提示したアカマツ木口断面写真(a)と加工板材写真(b)

比較対象となる従来法のサンプル画像(b)は、方向によりゆらぎ量が大きく変化し、調整が難しいため、木口面でのゆらぎが提案法と同等になるよう調整した。

評価実験では、図3.18に示すアカマツの木口面写真と加工板材写真とを提示し、3種類の合成画像の中から2枚を取り出す3通りの組合せすべてについて、取り出した2枚の合成画像のうちどちらのリアリティが高いか、5段階で回答させた。

3.7.2 評価結果

実験結果は、図3.19に示すとおりである。木口面での比較では、ばらつきが大きく、各合成方法に有意差は認められなかった。板目面、柾目面、3面セットの条件では、本手法を用いたサンプル (C)の平均嗜好度が最も高く、次いで(a)ゆらぎなし、(b)従来法の順であった。板目面と3面セットの条件下において、ゆらぎなしと従来法の両方に対して、95%信頼区間で提案手法が優れているという有意差が認められた。また、柾目面ではゆらぎなしに対して提案手法が優れているという有意差が認められた。本手法を用いた画像は、板目面と柾目面で高い評価を得ていることがわかった。

従来法によるゆらぎは、全ての面で同時に最適化することが難しく、条件によってはゆらぎがない場合よりもリアリティが下がってしまう可能性があることがわかった。それに対し、提案手法では全ての断面においてゆらぎがない場合よりもリアリティが向上していることがわかった。

板目面と柾目面での平均嗜好度が3面セットの平均嗜好度とほぼ同じ傾向を示していることから、板目面と柾目面のリアリティへの影響度が木口面より大きいと考えられる。

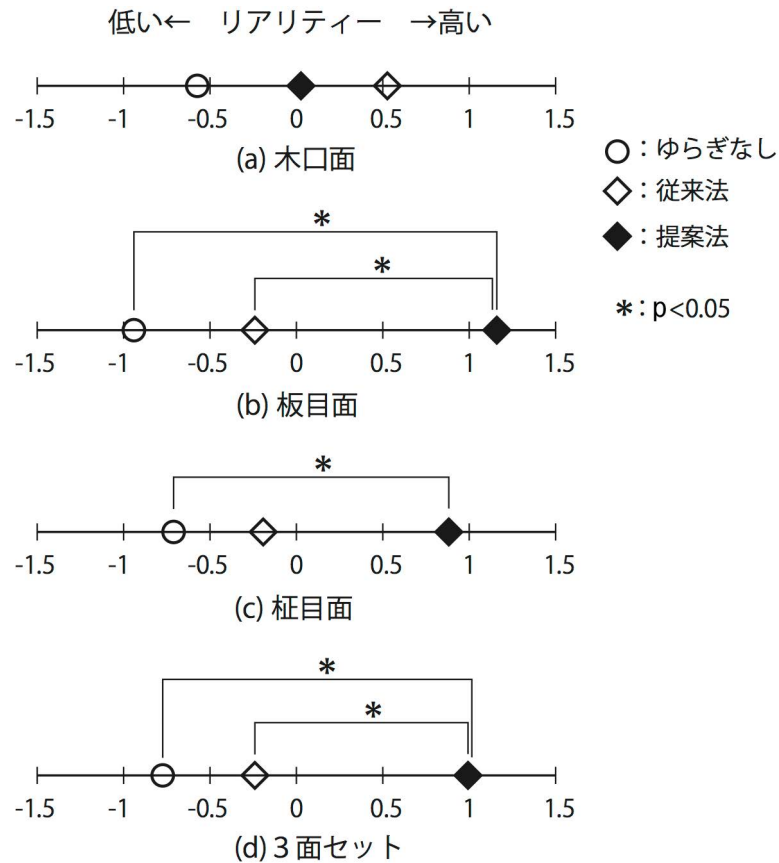


図3.19 リアリティーについての平均嗜好度

この結果から、本手法は木目模様のリアリティーを従来法よりも総合的に向上できることが確認できた。また、CGにおける木目模様のリアリティーを高めるためには、最適なゆらぎを付加することが不可欠であることも確認できた。リアリティーが向上した要因は、ゆらぎの発生を樹木の成長過程に結びつけてモデル化したことが貢献していると考えられる。

操作性に関しても、実際にテクスチャ画像を合成する作業を行った中で、従来の方法では切り出し角度が変わるとゆらぎの形状が大きく変化するため、最適なゆらぎ量を調節することが難しかったが、提案法ではパラメータと形状の関連性が明確で、ゆらぎ量の調節がしやすいと感じられた。

3.8 結言

木材における年輪形状の不規則なゆらぎをよりリアルに表現するため、アカマツの樹を例として年輪形状を計測し、ゆらぎの発生を骨格軸の非直線性、年輪間隔の不規則性、円周

方向の成長速度の不均一性の三点に着目してモデル化し、計算式を提案した。この手法を用いてレンダリングしたテクスチャ画像により、従来法とのリアリティの違いを感性的に比較する実験を行った。その結果提案手法は、これまでより自然な年輪形状を生成できることが確認できた。

今後、様々な樹種について分析を行い、その特徴をパラメータ化することにより、樹種の特徴をこれまでよりもリアルに表現できるようにしていきたい。

第4章

汎用木目テクスチャ生成システムへの実装

第4章 汎用木目テクスチャ生成システムへの実装

4.1 緒言

これまでの直線骨格モデル法の欠点を，曲線骨格モデル法により改良し，完全に3次元連続でなめらかな年輪パターンを生成できることを第2章で述べた．また，第3章では年輪形状のゆらぎの表現モデルを構築し，従来よりもリアルなゆらぎを持つ年輪パターンを生成することができるようになったことを述べた[40]．

これらの技術を実際のデザインの現場に適用するためには，デザインの現場で一般的に用いられている3次元CADシステムや3次元CGシステムと連携した木目テクスチャ生成システムを構築する必要がある．その一つの方法として，各CGアプリケーションに木目テクスチャ生成機能を追加するための，プラグインツールを開発する方法が考えられる．この方法では，各CGアプリケーションごとに専用のプラグインツールを開発する必要があり，効率的とは言えない．もう一つの方法は，3次元CADや3次元CGシステムが対応している形状データフォーマット及び画像データフォーマットに対応した，汎用的なアプリケーションを開発する方法が考えられる．こちらの方法は，一つのアプリケーションで多数の市販ソフトとの連携が可能であり，効率的である．また，利用度も高くなることが期待される．

そこで，開発した木目模様生成技術を，汎用型のテクスチャ生成システムとして実装しようと考えた．

第4章では，この汎用型の木目テクスチャ生成システムの処理フロー，市販ソフトとのインタフェース，様々なパラメータを簡単に調整するためのGUI，様々な樹種に対応するためのデータベースの仕様などについて述べる．

4.2 システムの概要

本システムの概要を図4.1に示す．本システムは，形状データの表示と画像合成結果の表示並びに各モジュールの動作を統合するメインコントローラ，テクスチャ合成に必要な様々なパラメータを設定するためのGUIを提供するパラメータエディタ，設定されたパラメータを元にテクスチャを合成するテクスチャジェネレータで構成されている．三つのモジュールはそれぞれの操作ウィンドウを持つ．図4.2にシステムの操作画面を示す．

メインコントローラウィンドウでは，CGアプリケーションのモデリング機能あるいは3次元CADでモデリングした自由曲面の形状データを読み込み，プレビュー用のビューポートに表示する．ビューポートには，同時にモデル樹木の骨格形状が表示されており，これを参考にしながら，ベジエ曲面の配置位置を調整する．

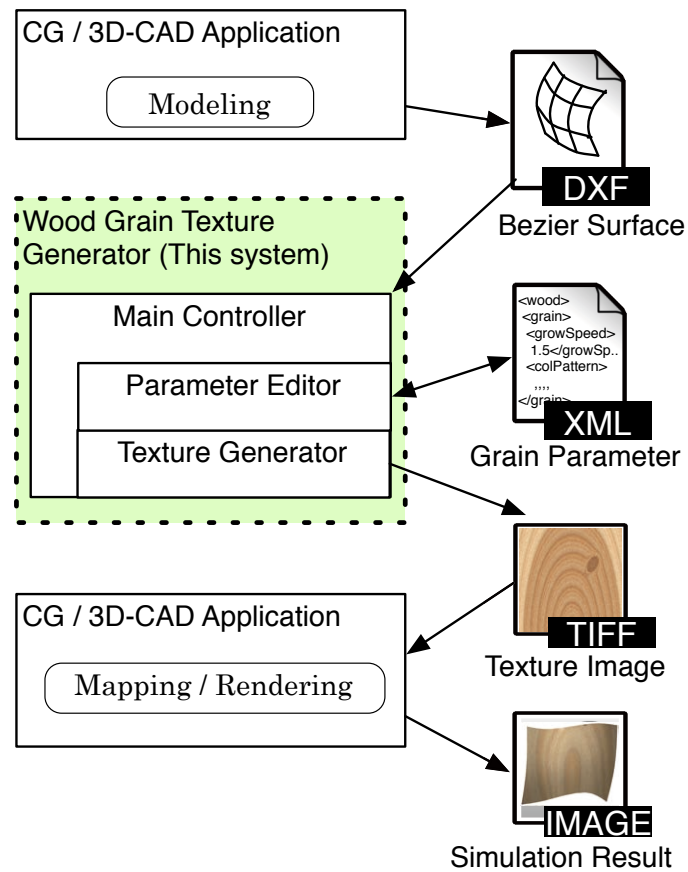


図4.1 システムの概要

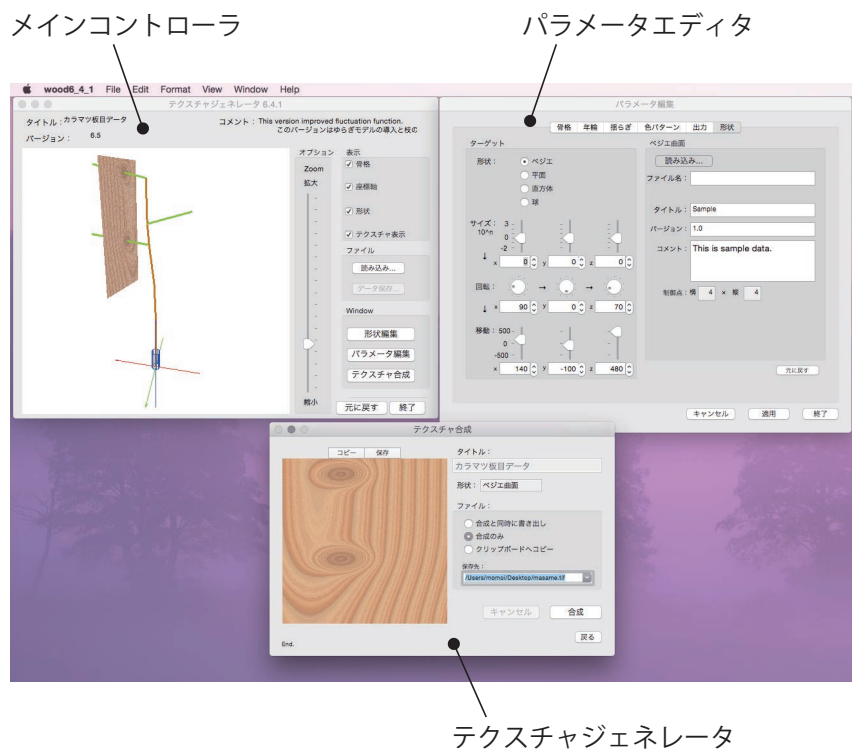


図4.2 システムの操作画面

パラメータエディタウィンドウは、グループ化された多数のパラメータ群の設定を行う複数のタブパネルで構成される。これらのパラメータの値は、統合されたファイルとして書き出し、読み込みができるようになっている。ベジエ曲面の座標変換をコントロールするためのダイヤル等もこの中に含まれる。テクスチャ生成においてユーザが設定できるパラメータの機能一覧を表4.1に示す。これらのパラメータの設定を変えることにより、多様な木目模様を生成することができる。

テクスチャジェネレータウィンドウには合成されたテクスチャ画像が表示されるビューポートや、レンダリングの実行ボタン、画像ファイルの保存のための操作ボタンなどが配置され

表4.1 テクスチャをコントロールするパラメータの機能

| | パラメータの機能 |
|------------|---|
| 骨格タブパネル | <ul style="list-style-type: none"> 骨格が広葉樹か針葉樹かの選択 枝の数の選択（最大16） 枝の太さの設定 枝の成長が収束する早さの設定 枝の成長が停止する半径の設定 模様全体の拡大縮小率の設定 |
| 年輪タブパネル | <ul style="list-style-type: none"> 心材域を半径で設定 心材域と辺材域の間の距離の設定 方角による成長速度の違いの比率の設定 樹齢に伴い年輪密度が高くなる度合いの設定 伸長成長の速度の設定 肥大成長の速度の設定 |
| 揺らぎタブパネル | <ul style="list-style-type: none"> 揺らぎ関数を構成する正弦波の数の設定(最大8) 最大8波それぞれの周波数の設定 最大8波それぞれの強さの設定 x,y,z方向の揺らぎの強さの設定 x,y,z方向の揺らぎ関数の位相の設定 揺らぎ関数全体の波長の設定 副年輪抑制のための画素シフト量の設定 不規則化パターン配列の投影スケールの設定 |
| 色パターンタブパネル | <ul style="list-style-type: none"> 樹種を選択して木目カラーパターンの選択 辺材と心材の色差をRGB値で設定 節の色差をRGB値で設定 |
| 出力タブパネル | <ul style="list-style-type: none"> 出力結果の保存方法の設定 テクスチャ画像の画素数の設定 出力画像のフォーマットの選択 |
| 形状タブパネル | <ul style="list-style-type: none"> テクスチャを合成する対象形状の選択 対象形状のx,y,z各軸方向の拡大倍率の設定 対象形状のx,y,z各軸周りの回転角度の設定 対象形状のx,y,z各軸方向の移動量の設定 対象形状が保存されているファイルの指定 |

ている。合成されたテクスチャ画像はメインコントローラのビューポート内の形状表面にリアルタイムでマッピングされた状態で表示され、3次元表示により確認することができる。

現在、本システムで入力できる3次元形状データは、双三次ベジエ曲面で表現されたDXF (Drawing eXchange Format) 形式[39]のファイルである。また、出力される画像ファイルはTIFF形式の非圧縮画像である。多くのCAD、CGアプリケーションが対応している形式であり、これによりこれらのアプリケーションとの連携が可能となっている。

4.3 年輪カラーパターンのサンプリングとデータベース化

本システムでは、樹種毎に年輪のカラーパターンをデータベースとして保有している。この樹種毎のカラーパターンが樹種の特徴表現では重要な要素となる。このカラーパターンのデータ形式は、RGB各8bitのフルカラーで、可変長の画素（デフォルトは256画素）で構成されている。

従来の骨格モデル法で用いていた年輪カラーパターンのデータは、下記の機材（スキャナ）を用いて、スキャン方向は考慮せず、色補正も行わずにサンプリングしたものである。そのため、実物サンプルの色との違いが明らかで、再サンプリングが課題となっていた。

- ・スキャナ：Nikon SCANTOUCH

新たなカラーパターンのサンプリング方法として、スキャナによる実物サンプルの取り込みとデジタルカメラによる撮影の2つの方法を検討した。

実験には次の機材を用いた。

- ・スキャナ：EPSON EP-904F
- ・デジタルカメラ：Nikon D7100, Sigma 18-200mmF3.5-6.3 DC OS HSM
- ・LEDライト：LED256LONG（株式会社ライトグラフィカ製、色温度5500℃相当）
- ・グレースケール：Kodak Gray Scale
- ・ディスプレイ：Apple LED Cinema Display
- ・色補正システム：ColorMunki
- ・画像加工アプリケーション：Adobe Photoshop CS6

4.3.1 スキャナによる取り込み方法の検討

スキャナによる取り込みは、実物サンプルをフラットベット型スキャナのテーブルに直接置いてスキャンする方法を検討した。スキャナによる取り込みの手順は次のとおりである。

- (1) 色補正システムを用いて、ディスプレイの色補正用プロファイルを作成する。
- (2) グレースケールをスキャンし、階調とカラーバランスを補正するトーンカーブを作成し、スキャナのプロファイルとして設定する。



(a) 軸方向が主スキャン方向の場合



(b) 軸方向が主スキャン方向と直角の場合

図4.3 スキャナにより別の角度でスギ画像を取り込んだ例

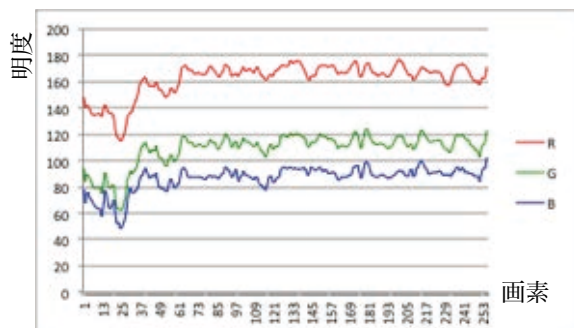


(a) 軸方向が主スキャン方向の場合

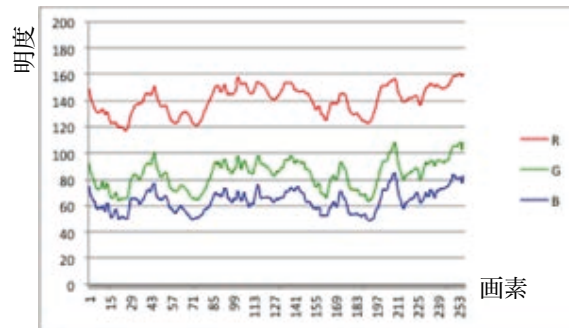


(b) 軸方向が主スキャン方向と直角の場合

図4.4 スキャナにより別の角度でケヤキ画像を取り込んだ例



(a) 軸方向が主スキャン方向の場合



(b) 軸方向が主スキャン方向と直角の場合

図4.5 ケヤキ画像から作成したカラーパターン

(3) 木材の実物サンプルをスキャンし、年輪の1年分を切り抜き、カラーモードをRGB各8bitとし、1×256画素にスケーリングする。

(4) 変換プログラムにより、画像をXMLファイルに変換する。

図4.3 (a), (b)にスギのスキャン画像を示す。二つの画像は、同じ場所を90°向きを変えて取り込んだものである。図4.4 (a), (b)には、同様にケヤキをスキャンした画像を示す。スギでは角度が変わっても色がほとんど変わっていないが、ケヤキでは色と模様が大きく異なっていることがわかる。これは、木材表面の微細な組織が異方性反射を起こす性質があることと、スキャナの光源に方向性があることにより生じる現象と考えられる。

ケヤキの2つの画像から、それぞれカラーパターンを作成し、グラフにしたものが図4.5 (a), (b)である。このグラフを見てもRGBのバランスと波形が大きく異なっていることがわかる。このような異方性反射が生じるため、スキャナによるカラーパターンデータの取り込みは、難しいと判断した。



(a) カラーチャートの撮影



(b) 木材片の撮影

図4.6 カラーパターンの撮影

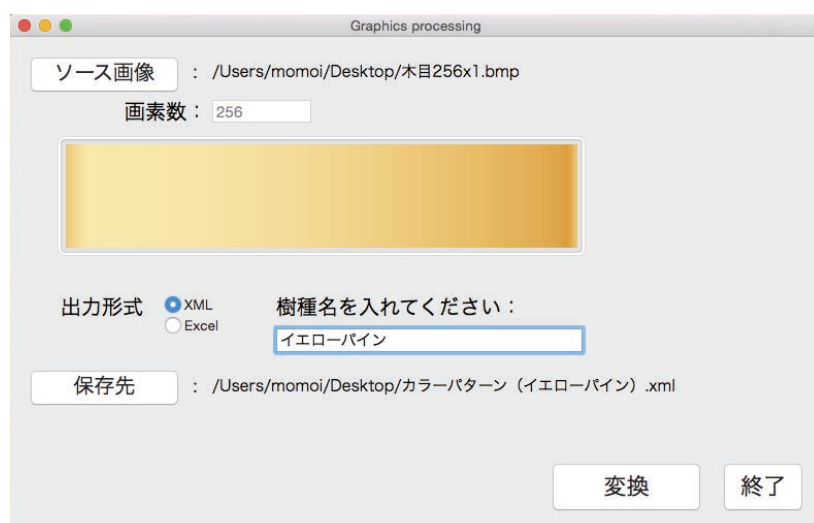


図4.7 ビットマップ画像からXMLへの変換ツール

4.3.2 デジタルカメラによる撮影方法の検討

次に、デジタルカメラによる木材サンプルの撮影方法を検討した。デジタルカメラの撮影にあたっては、異方性反射がなるべく少なくなるよう、照明の方向性があまり出ないように配慮した。そこで、撮影用のドームを用いて、照明が直接当たらないように配置した。また、照明とカメラが正反射の位置関係にならないように配慮した。

デジタルカメラによる撮影から、カラーパターンデータを作成するまでの作業は、次の手順で行った。

- (1) デジタルカメラによりカラーチャートを撮影し、色補正のプロファイルを作成する。
(図4.6 (a)参照)
- (2) 色補正の完了したデジタルカメラにより、木材片の表面を撮影し、画像ファイルとしてコンピュータに取り込む。(図4.6 (b)参照)
- (3) 画像から年輪一層分を高さ1画素で切り抜き、色深度を8 bitとする。
- (4) 切り抜いた画像の幅をカラーパターンの必要画素数にニアレストネイバー法[41]により縮小する。
- (5) 画像の各画素のRGB値をXML形式でカラーパターンファイルとして保存する。

撮影の際に用いた機材は、次のとおりである。

カラーパターンの縮小において、ニアレストネイバー法を用いる理由は、色が平均化してミクロな組織の質感が失われることを防ぐためである。スキャニングは、2000dpi以上の解像度で行い、最終的には500～1500dpi程度の解像度に相当する画素列データに加工する。

RGB値からXML形式への変換は、専用のアプリケーションを開発し用いた。このアプリケーションの操作画面を図4.7に示す。

現在、30種類の樹種のカラーパターンがデータベースに納められている。GUI上では樹種名で選択することができ、サムネイル画像を表示して仕上がりのイメージを想像できるようにした。

リスト4.1に、年輪カラーパターンXMLファイルの記述例を示す。

4.4 システムの処理フロー

図4.8に、テクスチャを生成する際の概念を示す。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 を走査して、1画素ずつ色を求めていく。

本システムの処理フローを図4.9に示す。形状データは、ベジエ曲面として3D-CADあるいは3D-CGアプリケーションで作成され、DXF形式でファイルに保存されており、本システムのメインコントローラが読み込む。図4.10にメインコントローラ画面を示す。読み込んだベジエ曲面は、メインコントローラのプレビューウィンドウで位置を確認しながら調整する。

リスト4.1 年輪カラーパターンXMLファイルの記述例

```
<?xml version='1.0' encoding='UTF-8'?>
<colorPatternLib>
  <header>
    <!--木目カラーパターンデータのフォーマット2015.05.01 S.Momoi -->
    <title>サンプルカラーパターンデータ</title>
    <version> 1.0 </version>
    <comment>
      木目カラーパターンライブラリ¥n
      This version is first basic version.
    </comment>
  </header>

  <numberOfPatterns> 1 </numberOfPatterns>

  <patterns>
    <colorPattern>
      <name> 1_カラマツ </name>
      <numberOfPixels> 256 </numberOfPixels>
      <pixels>
        <pixel> <r>183</r><g> 146</g><b> 101</b></pixel>
        <pixel> <r>187</r><g> 146</g><b> 107</b></pixel>
        <pixel> <r>182</r><g> 139</g><b> 102</b></pixel>
        <pixel> <r>184</r><g> 142</g><b> 102</b></pixel>
        <pixel> <r>184</r><g> 142</g><b> 105</b></pixel>
        <pixel> <r>183</r><g> 141</g><b> 107</b></pixel>
        <pixel> <r>193</r><g> 153</g><b> 114</b></pixel>
        <pixel> <r>195</r><g> 156</g><b> 118</b></pixel>
        <pixel> <r>186</r><g> 149</g><b> 108</b></pixel>
        <pixel> <r>192</r><g> 156</g><b> 112</b></pixel>
        <pixel> <r>202</r><g> 167</g><b> 123</b></pixel>
        <pixel> <r>195</r><g> 157</g><b> 115</b></pixel>
        <pixel> <r>190</r><g> 150</g><b> 114</b></pixel>
        <pixel> <r>197</r><g> 163</g><b> 123</b></pixel>
        <pixel> <r>199</r><g> 164</g><b> 124</b></pixel>
        <pixel> <r>194</r><g> 156</g><b> 117</b></pixel>
        <pixel> <r>191</r><g> 148</g><b> 104</b></pixel>
        <pixel> <r>193</r><g> 150</g><b> 110</b></pixel>
        <pixel> <r>192</r><g> 151</g><b> 110</b></pixel>
        <pixel> <r>192</r><g> 153</g><b> 111</b></pixel>
        <pixel> <r>192</r><g> 153</g><b> 114</b></pixel>
        <pixel> <r>196</r><g> 161</g><b> 120</b></pixel>
        <pixel> <r>193</r><g> 157</g><b> 116</b></pixel>
        <pixel> <r>186</r><g> 150</g><b> 107</b></pixel>
        <pixel> <r>184</r><g> 142</g><b> 105</b></pixel>
        <pixel> <r>188</r><g> 151</g><b> 110</b></pixel>
        <pixel> <r>196</r><g> 158</g><b> 121</b></pixel>
        <pixel> <r>204</r><g> 167</g><b> 128</b></pixel>
        <pixel> <r>204</r><g> 169</g><b> 123</b></pixel>
        <pixel> <r>196</r><g> 158</g><b> 112</b></pixel>
        <pixel> <r>191</r><g> 148</g><b> 106</b></pixel>
        <pixel> <r>192</r><g> 152</g><b> 108</b></pixel>
        <pixel> <r>196</r><g> 160</g><b> 115</b></pixel>
        <pixel> <r>194</r><g> 157</g><b> 111</b></pixel>
        <pixel> <r>196</r><g> 157</g><b> 118</b></pixel>
        <pixel> <r>205</r><g> 169</g><b> 129</b></pixel>
        <pixel> <r>199</r><g> 162</g><b> 112</b></pixel>
        <pixel> <r>197</r><g> 156</g><b> 106</b></pixel>
        <pixel> <r>191</r><g> 147</g><b> 105</b></pixel>
        <pixel> <r>198</r><g> 160</g><b> 121</b></pixel>

        . . . (中略) . . .

        <pixel> <r>178</r><g> 133</g><b> 95</b></pixel>
        <pixel> <r>175</r><g> 131</g><b> 86</b></pixel>
        <pixel> <r>175</r><g> 130</g><b> 87</b></pixel>
        <pixel> <r>188</r><g> 151</g><b> 114</b></pixel>
        <pixel> <r>184</r><g> 142</g><b> 104</b></pixel>
        <pixel> <r>183</r><g> 141</g><b> 98</b></pixel>
      </pixels>
    </colorPattern>
  </patterns>
</colorPatternLib>
```

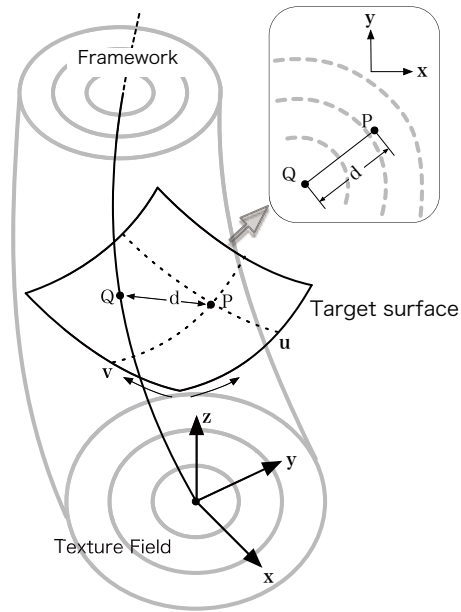


図4.8 システムのテクスチャ空間の概念

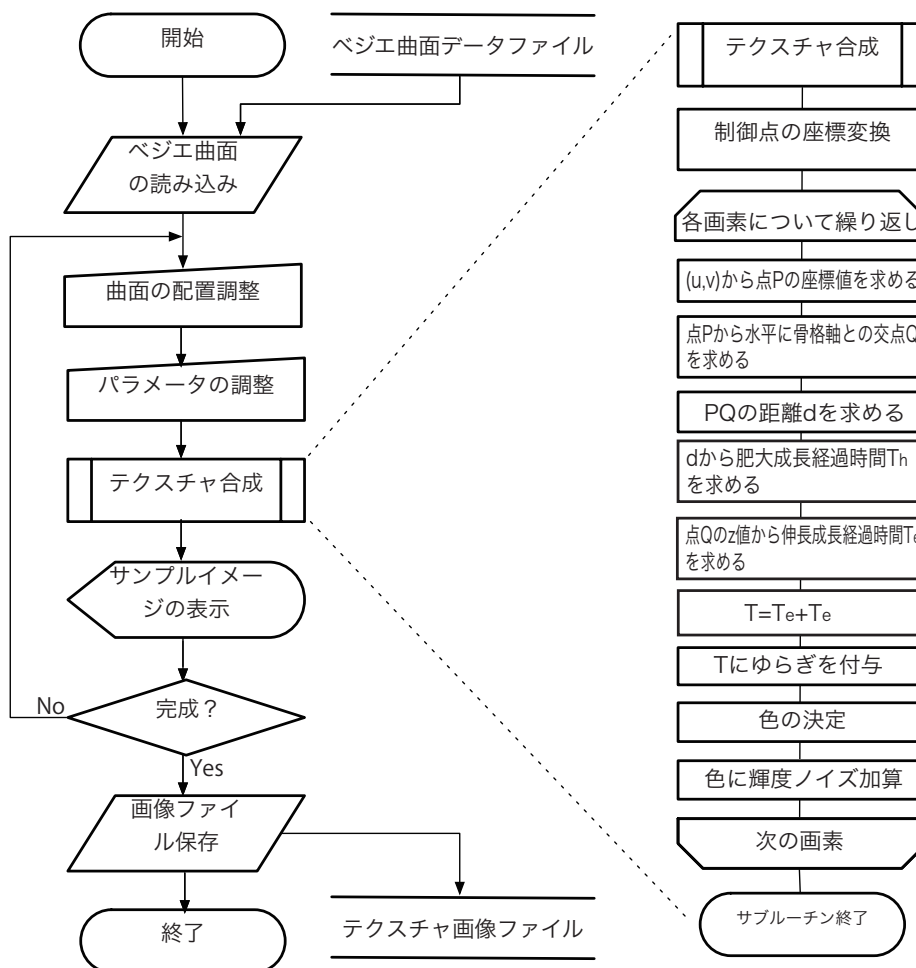


図4.9 システムの処理フロー

パラメータエディタには、ベジエ曲面の配置をコントロールするパネル、木目模様の樹種、節の有無、形状の不規則性などを調節するパネルなど複数のタブパネルが用意されており、パラメータの値を調整する。この設定を基に、テクスチャジェネレータによりテクスチャ画像を生成する。結果は、直ぐにメインコントローラのプレビューウィンドウ内に反映されるので、これを参考に設定を再度調節する。パラメータの調節と確認を繰り返し、満足できる結果が得られたら、完成したテクスチャ画像をファイルに書き出す。このテクスチャ画像は、CGアプリケーションに読み込まれ、形状の表面にマッピングされ、レンダリングされる。以下に、処理工程を詳しく述べる。

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 にゆらぎを加える。
- (8) T からカラーパターンテーブルを参照し、色を決定する。
- (9) 色に輝度ノイズを加える。

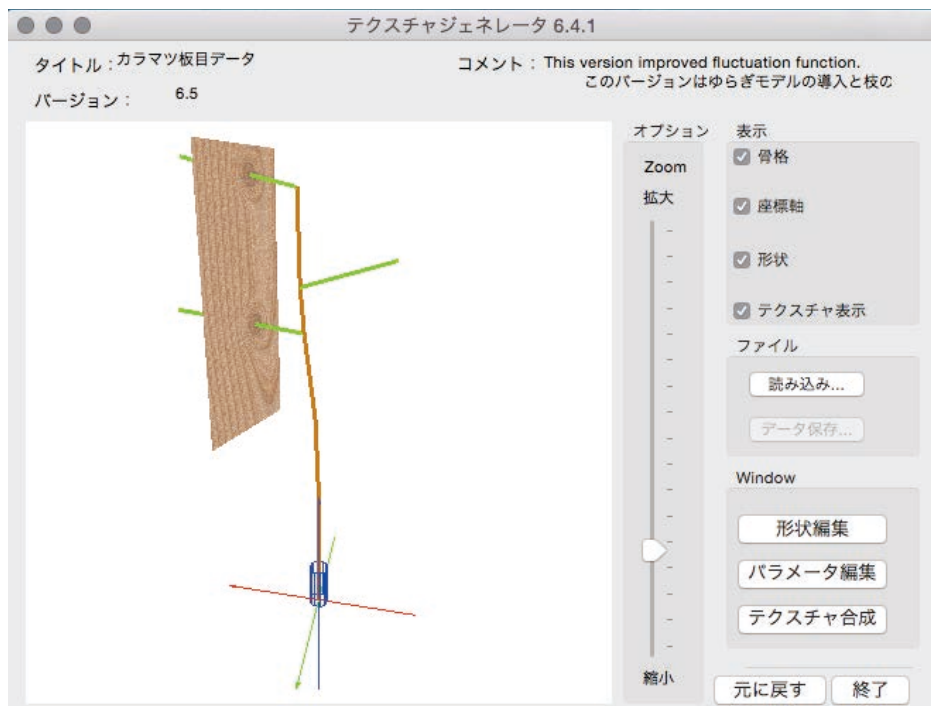


図4.10 メインコントローラ画面

4.4.1 形状データの入力

本システムが現在入力可能な自由曲面は、双3次ベジエ曲面である。双3次ベジエ曲面は、基本的な単位としては 4×4 の制御点群で構成される。複数のベジエ曲面をつないで複雑な形状を表現する場合は、隣り合う面は4つの端点を共有するので、縦 m 面、横 n 面で構成される自由曲面は、縦 $(m \times 3 + 1)$ 個、横 $(n \times 3 + 1)$ 個の点群行列により定義される。隣り合うベジエ曲面が滑らかに接続するための条件は、共有する端点とそれを挟んだ2つの制御点の3点が直線上に並んでいることである。これは、ベジエ曲面の端点の隣の制御点が端点における接ベクトルの方向を表しているという性質によるためである。また、ベジエ曲面は次のような性質を有している。

- (1) 端点一致性：四隅の制御点を必ず曲面が通る。
- (2) 凸包性：制御点を含む最小の凸接続した空間内に曲面が内包される。
- (3) アフィン不変性：曲面にアフィン変換を施した結果と制御点にアフィン変換を施して求めた曲面の形状が一致する。

この中のアフィン不変性により、ベジエ曲面をアフィン変換したい時に、制御点のアフィン変換を行ってその結果からBernsteinブレンド関数により曲面上の点を求めればよいことが保証されている。本システムでは、このアフィン不変性を利用して、自由曲面をテクスチャ空間の任意の場所に配置するためのアフィン変換を行っている。現時点では、本システムはベジエ曲面だけに対応しているが、同様の性質を持つBスプライン曲面、NURBS曲面、有理ベジエ曲面にも同じ方法を適用する事が可能である。

4.4.2 骨格形状データの編集

自然の針葉樹の中で特に大径木は管理された枝打ちにより枝が少なく、節の少ない非常に直線性の高い年輪模様が特徴となる。しかし間伐により伐採された小径木は枝打ちが十分でなく、多くの節が発生する。節のある木材は、純和風住宅や家具などでは傷材と見られて製品の表面に用いられることが少なかったが、最近では消費者の嗜好の変化とエコロジーの考え方の変化、また集成材への加工技術の高度化により、節のある材料を積極的に用いた建築物や家具などが見られるようになり、大径木と小径木どちらもデザインのバリエーションとして屋内壁面用などに多く用いられるようになった。本システムでは、幹の骨格の曲がり具合、枝の本数と位置を任意に定義することができる。この機能により、針葉樹と広葉樹の特徴の違いや節の発生頻度を調整することができる。予め、広葉樹用と針葉樹用のデフォルトの骨格データが用意されており、二者択一で基本的な骨格形状を設定することができる。また枝の本数は0～16本の範囲で選択することができる。節の多い木材を表現したいときは、枝の本数を多くし、檜の柱のように節の無い木材を表現したいときは、枝が0本の設定を選択すれば良い。また特殊な骨格構造の定義は、XML形式で記述された骨格データを読み込むことにより行うことができる。



図4.11 パラメータエディタの骨格タブ画面



図4.12 パラメータエディタの「形状タブ」画面

骨格形状は、パラメータエディタの「骨格タブ」パネル（図4.11参照）で編集することができる。幹の形状を決定するノードの数とそれぞれの座標値をテキストで編集できる。また、枝の数や位置もテキストで編集できる。編集した骨格の形状は、メインコントローラの3Dビュー（図4.10参照）に表示されるので、容易に確認できる。

4.4.3 テクスチャ位置の調整

テクスチャの切り出し位置の調整は、自由曲面をアフィン変換によりテクスチャ座標系の任意の位置に配置することにより行う。ここで用いるアフィン変換は、x,y,z各軸方向の拡大縮小、各軸周りの回転、各軸方向の平行移動の9つの要素で構成される。これらの値は、パラメータエディタの「形状タブ」パネル（図4.12参照）で調整することができる。

形状タブパネルで設定するそれぞれの図形変換は、次の計算式で求めることができる。

(1) 各軸方向の拡大縮小

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{S}(s_x, s_y, s_z) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

ここで、 s_x, s_y, s_z は各軸方向の拡大（縮小）倍率である。

(2) x軸周りの回転

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x(\theta_x) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x & 0 \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

ここで、 θ_x はx軸周りの回転角度である。

(3) y軸周り回転

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_y(\theta_y) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

ここで、 θ_y はy軸周りの回転角度である。

(4) z軸周り回転

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_z(\theta_z) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

ここで、 θ_z はz軸周りの回転角度である。

(5) 各軸方向の平行移動

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}(t_x, t_y, t_z) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

ここで、 t_x, t_y, t_z は各軸方向の移動距離である。

操作者が位置を正確に把握しやすいように、アフィン変換の各要素の順番を上記のとおり固定にしている。よって、これらの変換を統合した座標値は下記の式で求める事ができる。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}(t_x, t_y, t_z) \cdot \mathbf{R}_z \cdot \mathbf{R}_y \cdot \mathbf{R}_x \cdot \mathbf{S}(s_x, s_y, s_z) \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

ベジエ曲面の全ての制御点に対し、上記のアフィン変換を行い、テクスチャの生成に用いる。

4.4.4 テクスチャの生成

(1) 画像の画素番号から自由曲面パラメータへの変換

テクスチャ空間に配置されたベジエ曲面に対し、画像の座標系との対応付けは、ベジエ曲面のパラメータの変域を画像の画素番号との間で次式により対応付ける。

$$\begin{cases} u = \frac{k}{D_k - 1} \\ v = \frac{l}{D_l - 1} \end{cases} \quad (4.7)$$

ここで、 D_k, D_l はテクスチャ画像の画素数である。

(2) テクスチャ空間座標の計算

(4.7)式で求めたパラメータの値からテクスチャ空間へのアフィン変換を行ったベジエ

曲面上での座標値を計算する．パラメータに対応したベジエ曲面上の点の座標値は下記の式で求めることができる．

$$P(u,v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 P_{ij} \cdot B_i^3(u) \cdot B_j^3(v) \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (0 \leq v \leq 1) \quad (4.8)$$

ただし，

$$\begin{cases} B_i^3(u) = \binom{3}{i} u^i (1-u)^{3-i} = \frac{3!}{i!(3-i)!} u^i (1-u)^{3-i} \\ B_j^3(v) = \binom{3}{j} u^j (1-v)^{3-j} = \frac{3!}{j!(3-j)!} v^j (1-v)^{3-j} \end{cases} \quad (4.9)$$

この座標値 $P(u,v)$ から樹木成長モデルに基づく成長経過時間 T を求める．

(3) 成長経過時間の計算

樹木成長モデルでは，成長原点Oから骨格軸上に成長端点が伸びていく伸長成長と成長端点が骨格上の再近接点Qまで到達した時点から太さ方向に年輪が形成されていく肥大成長により樹体が増大していく．テクスチャ空間内の任意の点Pにおける年輪の色は，点Pまで樹体が到達するまでに要した成長経過時間 T を求めることにより，決定する．枝が無いときの T は，次式により求める．

$$T = \frac{D_a}{S_a} + \frac{D_b}{S_b} \quad (4.10)$$

ここで， D_a ：原点Oから再近接点Qまでの高さの距離， D_b ：再近接点Qから点Pまでの距離， S_a ：伸長成長の速度， S_b ：肥大成長の速度を表す．

(4) カラーパターンのマッピング

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4.13に示す．カラーパター

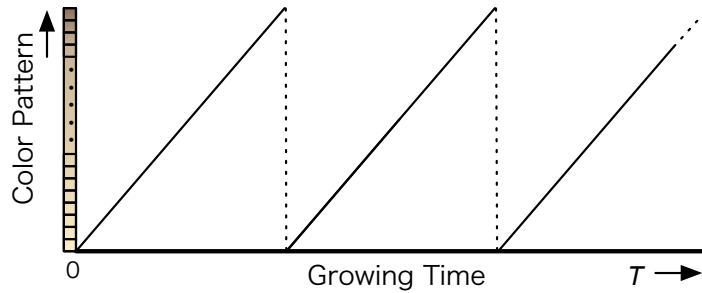


図4.13 成長経過時間とカラーパターンの関係

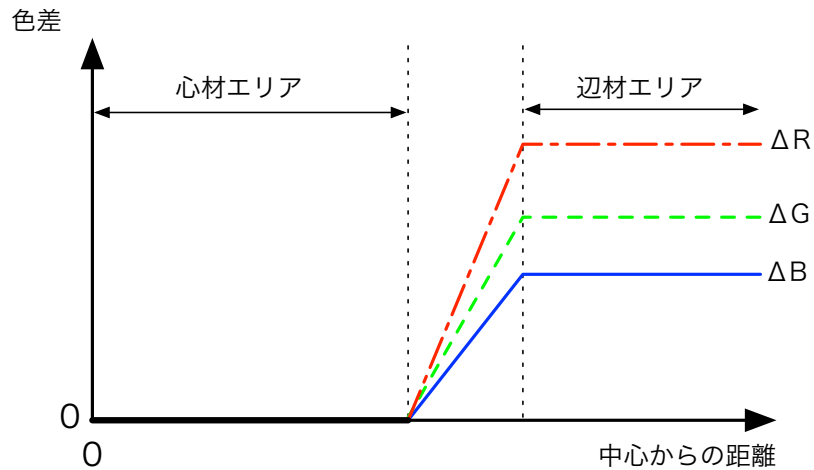


図4.14 心材・辺材の色差の概念図

ンは、樹木の1年間の肥大成長により早材から晩材への色変化をサンプリングしたものである。よって、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す。

(5) 心材と辺材の色差

自然の樹木では、中心から太さ方向に向かって色が濃色から淡色へと変化する。モデル樹木では、この心材から辺材への変化も表現できるよう考慮している。この心材と辺材の色差を調整するためのパラメータを用意した。この色差はRGBの数値として表され成長経過時間が心材エリアから辺材エリアまでの中間域で緩やかに変化するようにカラーパターンから求めたRGB値に加算される。中心軸からの距離と色差の関係を図4.14に示す。

(6) 節部の色差

自然の樹木では、枝が立ち枯れした部位に生じる節の周辺は濃色となる。この現象を表現するため、枝の骨格から一定距離内を節のエリアとして、カラーパターンから参照したRGB値から節による色差分を差し引く。

4.4.5 枝の周辺の処理

テクスチャ空間内の任意の点Pの位置の色は、Pにおける成長経過時間から求めることができる。枝の周辺では、幹から直接肥大成長する経路と枝を経由した成長経路で成長経過時間を比較し、短い値を採用する。しかし、単純に比較するだけでは、境界付近で年輪形状が急激に変化してしまうため、不自然なテクスチャになってしまう。そこで、境界付近で

は2つの経路の成長経過時間をブレンドすることにより、年輪の滑らかな連続性を実現する。
(図2.5参照)。

まず、テクスチャ空間の任意の点Pについて、幹から直接肥大成長して到達する経路の成長経過時間 T_t と、点Pに最も近い枝を経由して到達する成長経過時間 T_b を求める。

$$T_t = T_e + T_h \quad (4.11)$$

$$T_b = T_\alpha + T_\beta + T_\gamma \quad (4.12)$$

ここで、 T_e ：幹の骨格上を伸長成長する時間、 T_h ：幹の骨格から肥大成長する時間、 T_α ：幹の骨格上を伸長成長する時間、 T_β ：枝の骨格上を伸長成長する時間、 T_γ ：枝から肥大成長する時間を表す。

次に、この二つの成長経過時間を次式によりブレンドする。

$$T = \frac{T_b \cdot T_t}{\sqrt{T_b^2 + T_t^2}} \quad (4.13)$$

(4.13)式で求めた T を、あらかじめ用意した年輪のカラーパターンに対応づけることにより、3次元的に連続な年輪模様を生成する。

4.4.6 樹体の形状特性の近似

図4.15に樹体の構造の概念を示す。幹の半径の高さに応じた変化は、根元に近い地際部では放物線状に太く、枝下部ではあまり径が変わらず、円柱に近い形をしている。樹の先端に近い樹冠部では急激に細くなり、円錐に近い形となる[42]。木材として用いられるのは、枝下から地際までが主体となる。

このように根本が太く、先端に向けて徐々に細くなる形状を表現するため、本システムでは次のような式により、肥大成長速度を高さに応じて変化させている。

$$s'_b = s_b(1 + r_e \cdot r_s^{T_h}) \quad (4.14)$$

ここで、 s'_b ：補正後の肥大成長速度、 s_b ：補正前の肥大成長速度、 r_e ：先細り効果の最大値、 r_s ：先細り効果の急激度、 T_h ：肥大成長経過時間を表す。

また横断面で見ると、若い間の活発な成長に比べ、樹齢とともに肥大成長が緩やかに遅くなっていく。この度合いは樹種や環境によって変化する。このような特徴を表現するため、本システムでは次のような式を用いて、肥大成長経過時間を変換している。

$$T'_h = T_h^{E_{age}} \quad (4.15)$$

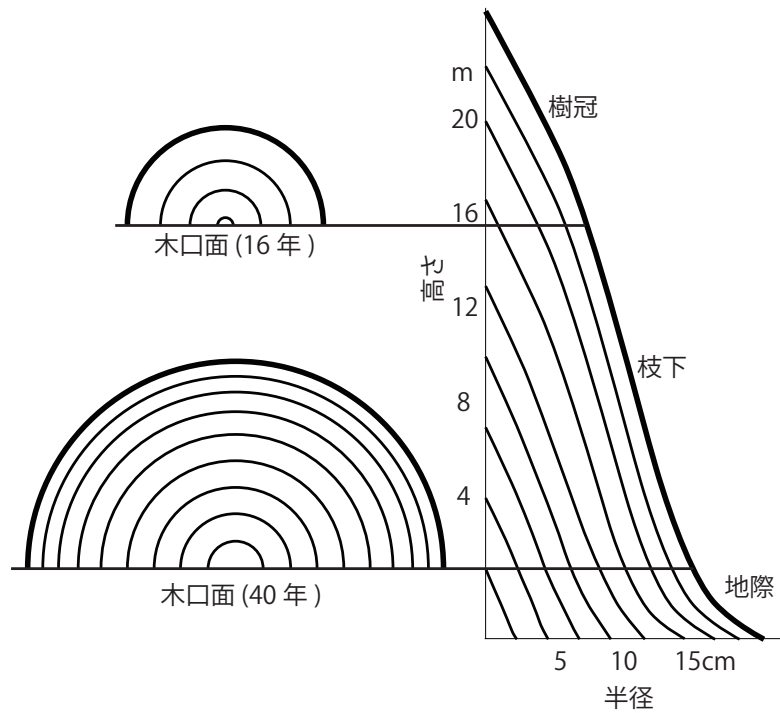


図4.15 樹体の形状
(文献[42]を参考に再構成)

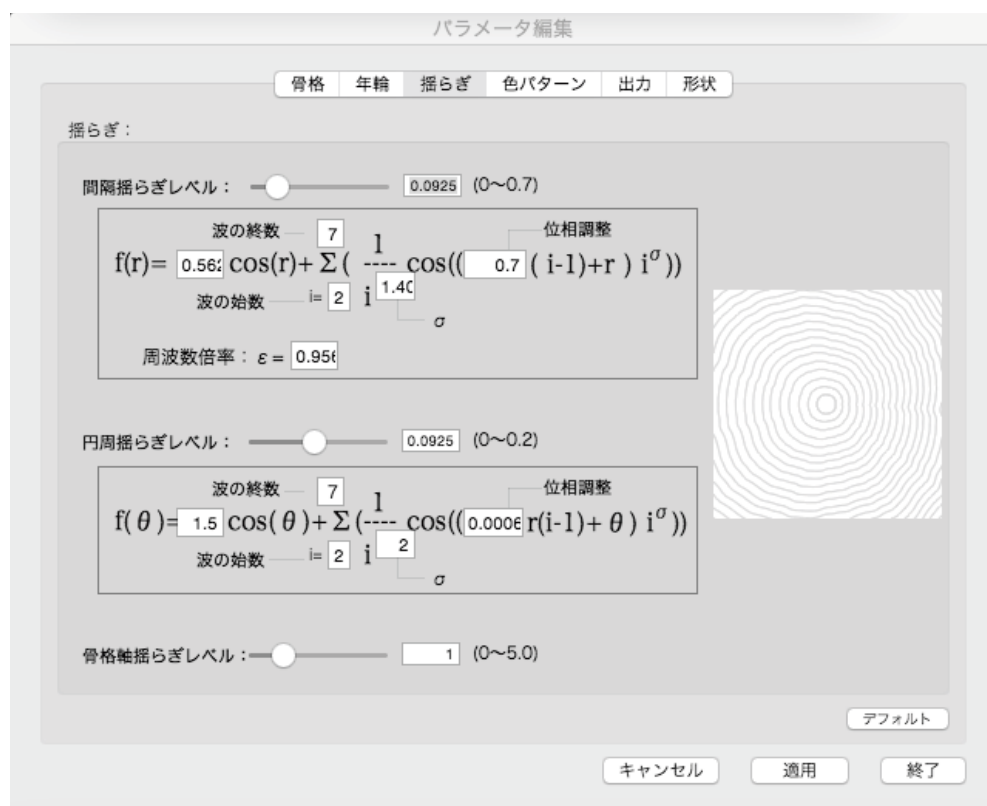


図4.16 パラメータエディタの「ゆらぎ」タブパネル

ここで, T_h' : 樹齢による成長鈍化効果変換後の肥大成長経過時間, T_h : 変換前の肥大成長経過時間, E_{age} : 樹齢による成長鈍化効果の強さを表す.

4.4.7 不規則化による自然な模様の生成

(1)形状の不規則化



(a)ランダム画素シフトなし



(d) 5画素以内



(c)10画素以内



(d)20画素以内

図4.17 ランダム画素シフト適用による画像の変化

年輪の形状を不規則化するために、本システムでは第3章で述べたゆらぎモデルを用いて、年輪形状にゆらぎを与えている。3つのゆらぎのうち、骨格軸のゆらぎは、4.4.2で述べた方法で設定している。また、アカマツの樹体から計測した骨格軸形状を用いて、ゆらぎ量のレベルを調節するスライダーも用意してある。年輪間隔のゆらぎと円周方向のゆらぎは、図4.16に示す「ゆらぎ」タブパネルで設定することができる。間隔ゆらぎ関数、円周ゆらぎ関数それぞれの数式のパラメータ部に値を設定することにより、おおまかな年輪形状が表示されるので、感覚的に調整することが可能である。

(2) カラーパターンの不規則化による副年輪の防止

年輪のカラーパターンを同心円状にマッピングすると、図4.17(a)のように微細な筋（以下「副年輪」と呼ぶ）が明瞭に現れて、不自然な模様となってしまう。そこでカラーパターンをマッピングする際に任意の画素数の範囲で本来の参照画素位置からランダムに分散シフトさせること（以下「ランダム画素シフト」と呼ぶ）により模様の不規則化を行って、副年輪の発生を抑制している。パラメータエディタのGUIから画素数を指定して分散範囲を設定することができる。図4.17(b)～(d)に、256画素のカラーパターンにランダム画素シフトの最大分散量を5、10、20画素と変えた時のテクスチャ画像の変化の例を示す。この結果から、分散量が大きくなるほど副年輪が目立たなくなっていくことが分かる。

(3) 色の不規則化

カラーパターンのランダム画素シフトによっても木材の微細な繊維組織によるザラザラ感はある程度得られるが、年輪のカラーパターンにおける色のバラツキが比較的少ない場合には、256画素が持つ限られた色数しか現れないため、色の変化（ザラザラ感）が足りないテクスチャとなってしまう場合がある。このような時は、カラーパターンに輝度ノイズを加えることにより、ザラザラとした質感を強めることができる。ただし、輝度ノイズのマッピング方向を骨格に対して横方向からにすると樹の繊維組織の向きと不整合が起きてしまうので、Z軸方向に投影している。ノイズのパターンは全ての画素に対してその都度発生させていたのでは計算負荷が増えてしまうので、あらかじめ16×16画素の輝度ノイズパターンを用意しておき、座標値の剰余計算による参照によりノイズ値を取り出すことにより、高速化を図った。図4.18に(a)輝度ノイズを加えない場合、(b)5%以内加えた場合と(c)8%以内加えた場合のテクスチャ合成例を示す。ノイズの量は、最高輝度値に対する変動幅の比率で表している。

この図から、輝度ノイズの量が増えるに従い、次第にザラザラした質感になっていくことが確認できる。

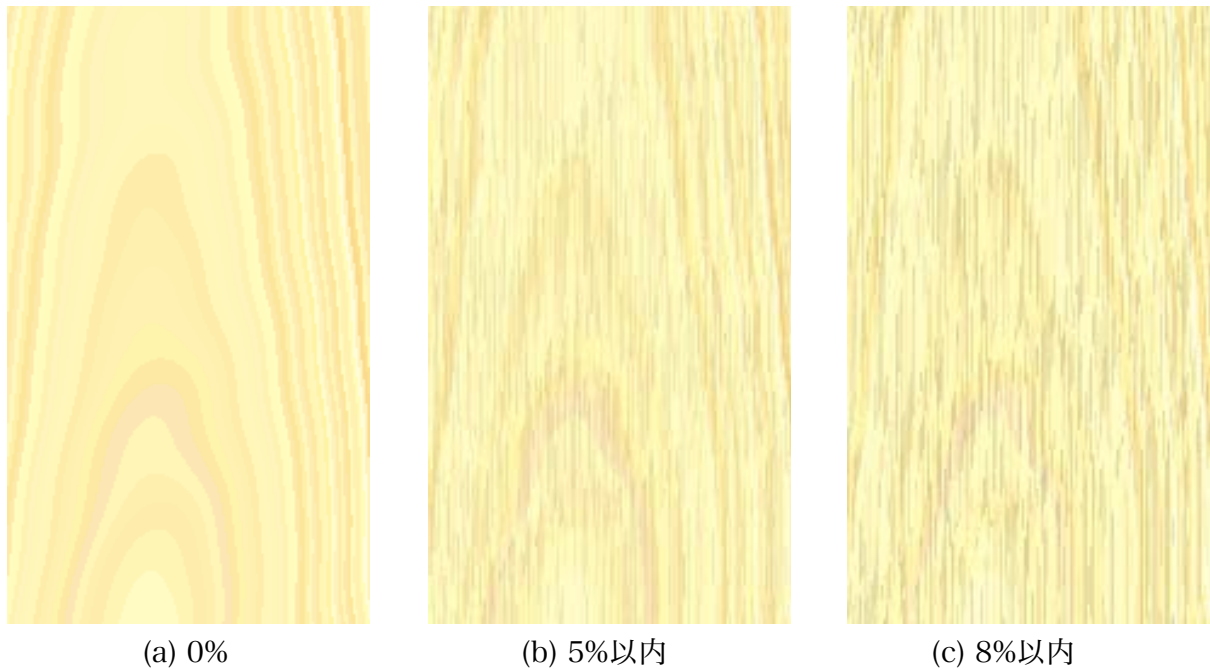


図4.18 輝度ノイズ適用による画像の変化

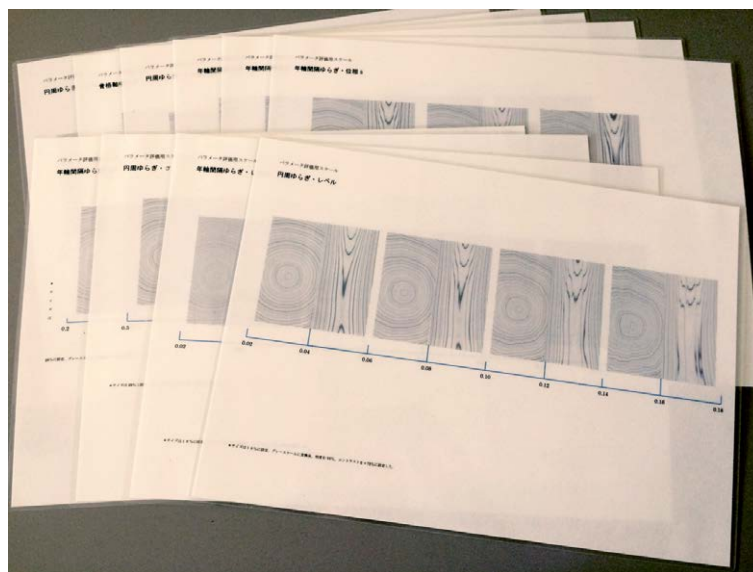


図4.19 ゆらぎパラメータ官能計測用スケール

4.5 樹種ごとのゆらぎパラメータ値の決定

4.5.1 イメージスケールによる最適値の計測

様々な樹種の年輪形状をリアルに表現できるようにするため、樹種ごとに最適なゆらぎパラメータ値を計測することを試みた。計測の対象として、国産材の中で一般的な樹種であ



図4.20 感覚計測用スケールを用いた計測実験のようす

表4.2 ゆらぎパラメータの官能計測結果

() 内は標準偏差

| パラメータ 樹種 | 骨格軸ゆらぎ | 年輪間隔ゆらぎ | | | | | 円周方向ゆらぎ | | | |
|-------------|----------------|------------------|------------------|----------------|----------------------------|-----------------------|------------------|----------------------|----------------|-------------------|
| | レベル o | レベル q | 基本波の 強さ k1 | 位相シフト s | 周波数倍 率 ε | 多重化累 乗 σ | レベル p | 位相シフト s | 多重化数 n | 多重化累乗 σ |
| アカマツ | 0.59 (0.19) | 0.085 (0.041) | 0.72 (0.19) | 0.79 (0.38) | 0.86 (0.39) | 1.25 (0.49) | 0.12 (0.19) | 0.00038 (0.00037) | 6.0 (1.31) | 1.56 (1.02) |
| カラマツ | 0.91 (0.50) | 0.093 (0.038) | 0.56 (0.26) | 0.70 (0.29) | 0.96 (0.28) | 1.41 (0.35) | 0.093 (0.032) | 0.00060 (0.0003) | 7.0 (1.31) | 2.06 (0.62) |
| ケヤキ | 1.53 (0.54) | 0.12 (0.055) | 0.48 (0.30) | 0.67 (0.39) | 1.15 (0.33) | 1.47 (0.23) | 0.063 (0.043) | 0.00048 (0.00048) | 7.38 (2.07) | 1.06 (0.82) |
| スギ | 1.41 (0.65) | 0.10 (0.056) | 0.60 (0.24) | 0.56 (0.36) | 1.08 (0.34) | 1.62 (0.45) | 0.095 (0.051) | 0.00058 (0.00039) | 7.5 (2.27) | 1.13 (0.35) |
| チーク | 1.13 (0.50) | 0.088 (0.034) | 0.54 (0.26) | 0.48 (0.29) | 0.91 (0.28) | 1.38 (0.35) | 0.098 (0.032) | 0.00031 (0.00031) | 7.13 (1.31) | 1.75 (0.62) |
| ヒノキ | 1.50 (0.53) | 0.11 (0.046) | 0.45 (0.27) | 0.78 (0.21) | 1.08 (0.37) | 1.61 (0.34) | 0.095 (0.041) | 0.00029 (0.00030) | 7.63 (2.07) | 1.69 (0.59) |

注1) 多重化数n, 円周方向ゆらぎの多重化累乗 σ は, 実際には整数しかとることができない。

注2) 年輪間隔ゆらぎの周期は ε で調整できるため, 多重化数は7に固定した。

るアカマツ, カラマツ, ケヤキ, スギ, ヒノキの5種と外材広葉樹の中から床材に多く用いられるチークの合計6種を用いることにした。計測の方法は次のような手順による。

- (1) 標準値を基準として一つのパラメータについて, 値を実用的な範囲で3～4段階に変化させ, テクスチャを合成する。
- (2) この画像を用いて図4.19に示すような官能計測用スケールを作成する。
- (3) 被験者8人に, このスケールと各樹種の実物サンプルを提示し, 最も近いと思われるパラメータの値をスケールから読み取り, 回答させる。
- (4) パラメータごとに計測した値を平均して, その樹種用の計測値とする。

パラメータ値の官能計測試験の様子を、図4.20に示す。また、各樹種ごとに求めた各パラメータの計測値を表4.2に示す。

4.6 評価実験

4.6.1 色のリアリティ評価

年輪カラーパターンの色のリアリティを評価するため、次のような実験を行った。従来のデータと実物サンプルで共通の樹種15種類について、①従来のカラーパターンデータ（色補正なし、スキャナによるサンプリング）、②スキャナにより色補正を行いサンプリング、③デジタルカメラにより色補正を行いサンプリング、の3種類のカラーパターンデータを用いて、標準値のゆらぎを与えてテクスチャ画像を合成し、被験者による実物サンプルとの比較により、色のリアリティの採点を行った。②のスキャナによる読み取りは、スキャン方向を90度変えて2回行い、実物に近いと感じた方を選択した。評価は、樹種ごとに①～③の画像を色補正済みのディスプレイにランダムな順番に並べて表示し、5段階（1：全然似ていない、2：少し似ている、3：似ている、4：かなり似ている、5：ほとんど同じ）で得点を付けさせた。被験者は、学生11人で、得点の平均を求めて比較した。

図4.21に、実験結果を示す。3種類の方法の中で、③のデジタルカメラを用いてサンプリングしたデータを用いた場合が、全ての樹種において最も得点が高かった。この方法で、多くの樹種では、ほぼ満足できる結果が得られた。

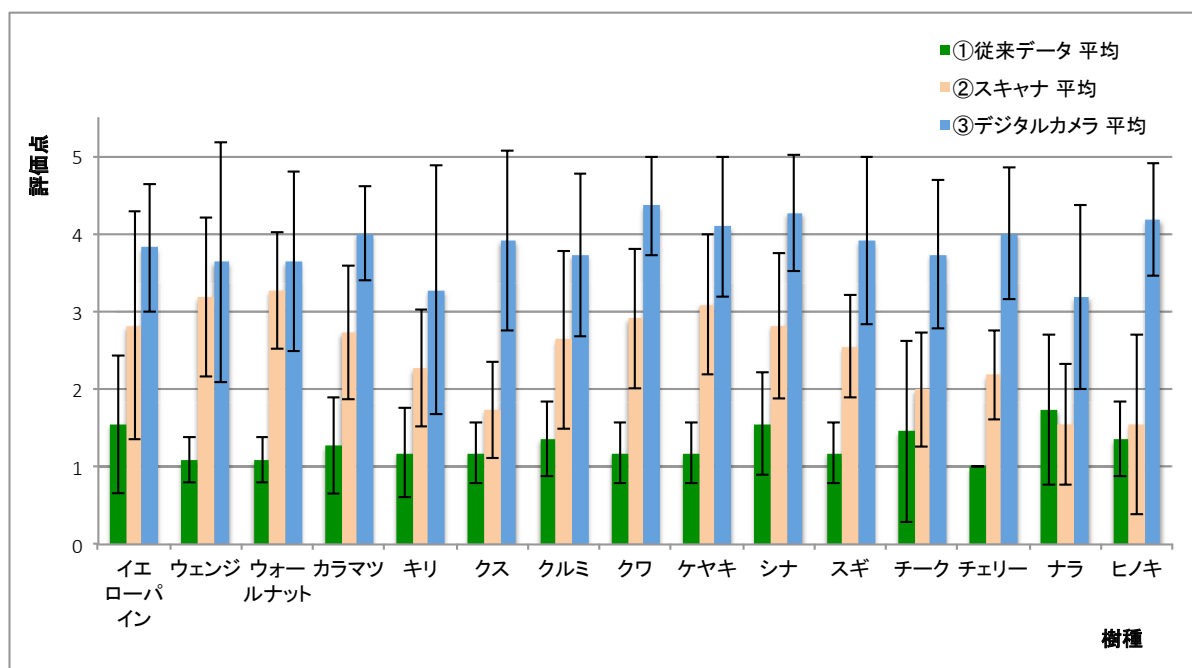


図4.21 3つのサンプリング方法によるカラーパターンデータのリアリティ比較

その一方で、キリ、ナラなどの一部の樹種ではまだサンプリングした色と感覚との間にズレがあることがわかった。この原因は、サンプリングエリアの狭さにあると思われる。木材サンプルには場所によって色斑があり、色斑が比較的大きい樹種では、全体の色とサンプリングした箇所の色が異なり、印象が違ってしまふことが考えられる。またこれらの樹種は、異方性反射の性質が強い樹種でもあるので、これも一つの原因と考えられる。これを解決するためには、サンプリングした色を実物サンプル全体の色の印象に合わせて補正する必要がある。

4.6.2 ゆらぎのリアリティ評価

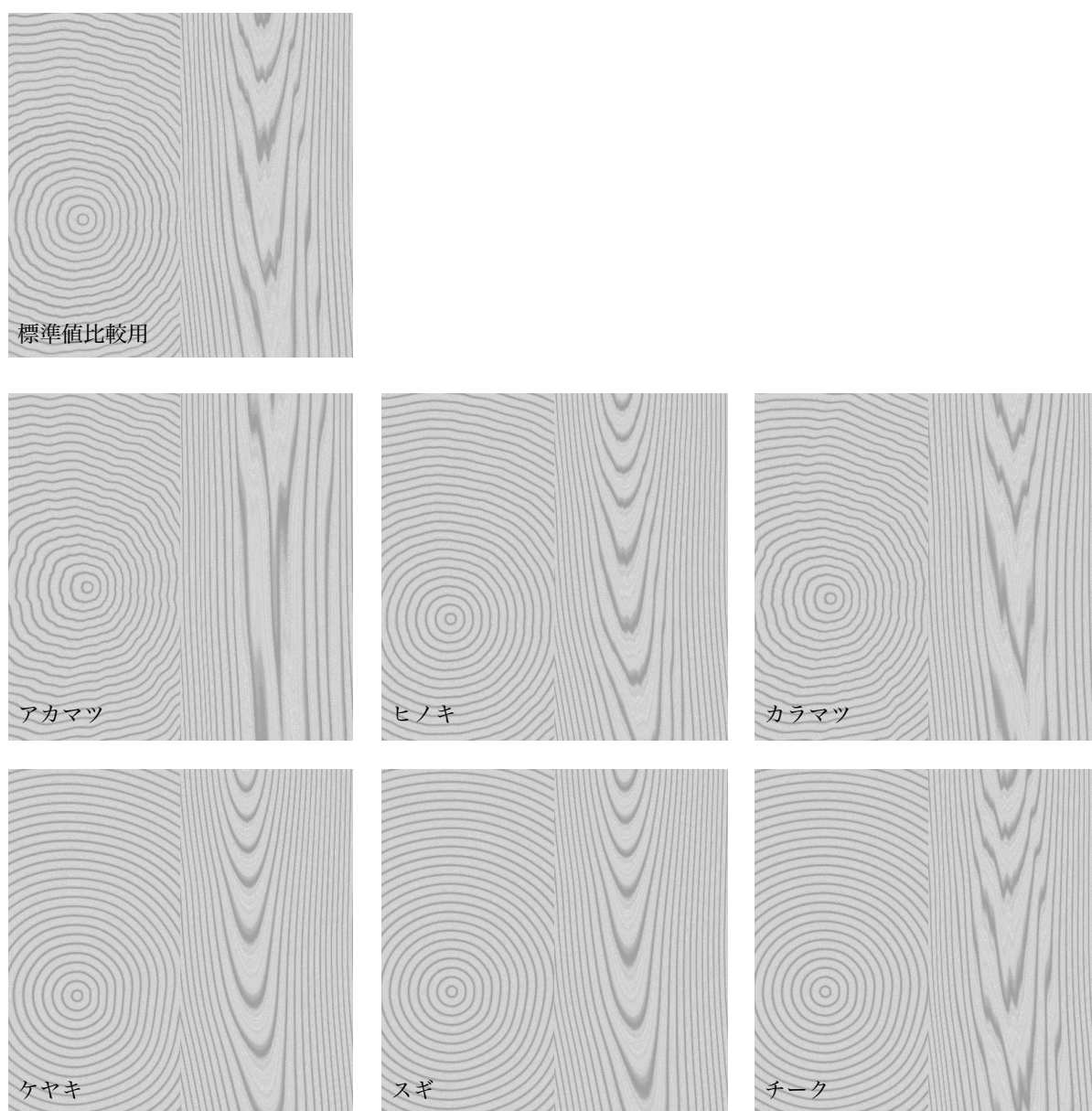


図4.22 ゆらぎパラメータ値評価用画像

樹種ごとのゆらぎのパラメータ値を計測して決定した結果をもとに、どの程度ゆらぎの樹種らしさが表現できているのかを評価する実験を行った。評価対象として、国産材の中で一般的な樹種5種と外材広葉樹の中から床材に多く用いられるチークの合計6種について、表4.2に示す計測値を用いてテクスチャ画像を作成した。テクスチャ画像の作成にあたっては、ゆらぎの効果だけを評価できるよう、年輪カラーパターンは全ての樹種で、ゆらぎを確認しやすいアカマツのものを使用した。木口面と板目面の画像を用意し、グレースケールに変換してから、コントラストを高めて評価試験に用いた。図4.22に比較対象の標準値（第3章6項を参照）による生成画像と各樹種の計測値による生成画像の違いを示す。

評価方法は、①標準値で作成したテクスチャ画像と②評価対象の6種を個別に比較し、それぞれの樹種の実物の木材サンプルを提示しながら、①と②の画像を比較してどちらが実物のゆらぎに似ているかを回答させた。回答方法は、{①が似ている、②が似ている、どちらも同じ、どちらも違う}の4つから1つを選択する方法とした。被験者は、学生および教員21名を対象とした。

図4.23に評価実験結果のグラフを示す。アカマツ、ヒノキでは計測値を用いた方が似ていると回答した数が多かった。ケヤキ、チークではどちらも似ていないという回答比率が高かった。一部の樹種では、官能計測値を用いるとリアリティの向上が見られるが、総合的に見ると、計測した平均値をパラメータの値に設定するだけでは、満足な結果は得られなかった。

平均値だけで、リアリティが得られなかった理由として、ゆらぎの周波数特性が複数のパラメータ (k, i, σ) の相互関係で決まる仕組みになっていることが原因の一つと考えられる。また、計測値そのものの標準偏差が大きいことから、個別のパラメータによる効果が分かりにくいことが推察される。さらに、 i は整数値しか取ることができず、円周方向のゆらぎ関数の σ は、連続性を保つために整数値しか取ることができないため、実際には平均値ではな

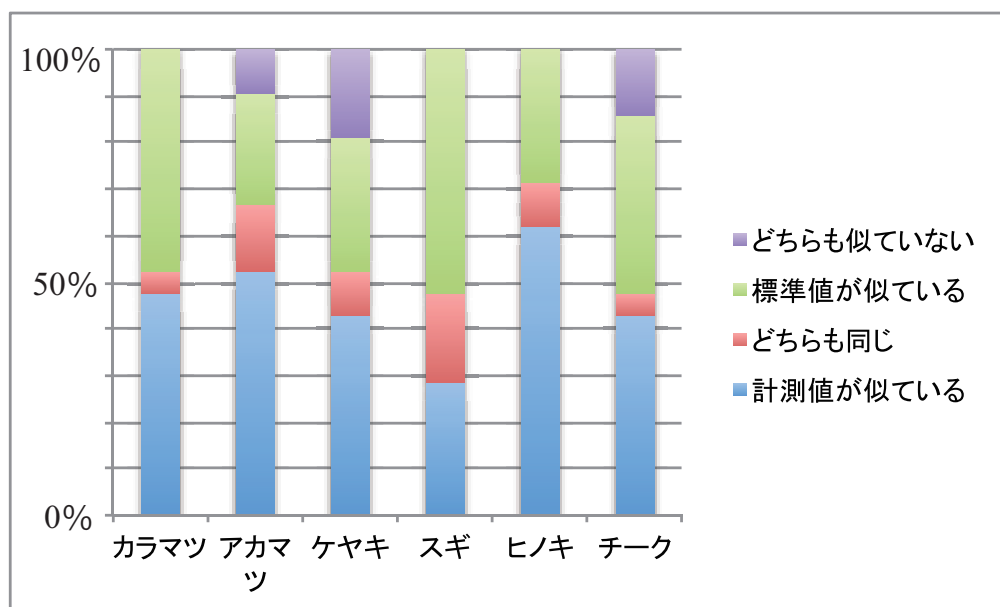


図4.23 パラメータ標準値と計測値によるリアリティの比較結果



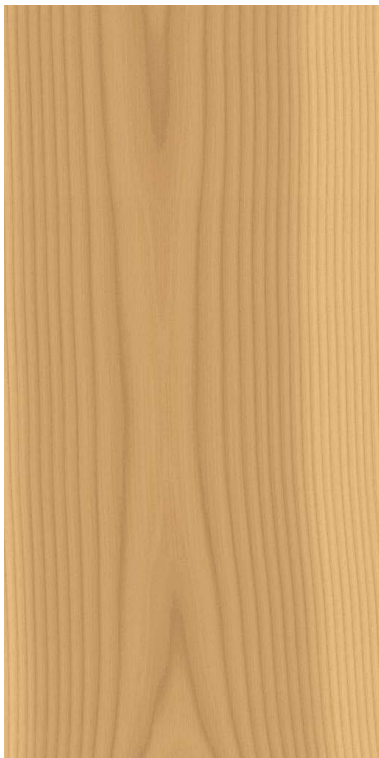
(a) アカマツ



(b) スギ



(c) ヒノキ



(d) カラマツ



(e) カラマツ (節あり)



(f) キリ

図4.24 様々な樹種の表現例

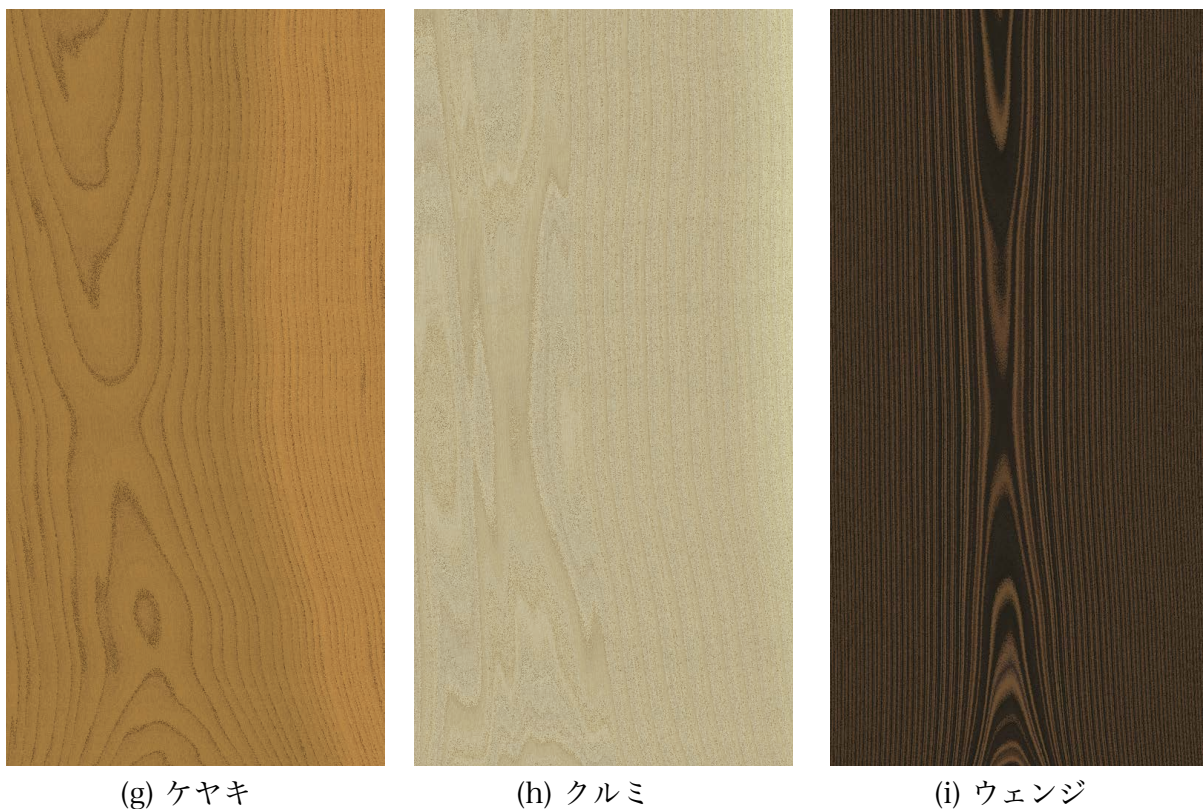


図4.24 様々な樹種の表現例

表4.3 樹種の特徴表現で用いたゆらぎレベル等設定値

| | 骨格軸ゆらぎ | 年輪間隔ゆらぎ | 円周方向ゆらぎ | その他 |
|---------------|---------|-----------|----------------------|--------------------------------|
| (a)アカマツ | レベル=1.0 | レベル=0.2 | レベル=0.06, i=2~6 | 輝度ノイズ=0.02 |
| (b)スギ | レベル=1.0 | レベル=0.2 | レベル=0.05, i=2~10 | 輝度ノイズ=0 |
| (c)ヒノキ | レベル=0.6 | レベル=0.24 | レベル=0.02, i=2~8 | 輝度ノイズ=0.01 |
| (d)カラマツ | レベル=0.6 | レベル=0.25 | レベル=0.02, i=2~8 | 輝度ノイズ=0.02 |
| (e)カラマツ (節あり) | レベル=0.6 | レベル=0.25 | レベル=0.02, i=2~8 | 輝度ノイズ=0.02, 枝=4本, 枝の影響度=0.6 |
| (f)キリ | レベル=1.0 | レベル=0.106 | レベル=0.12, i=2~8 | 輝度ノイズ=0.02 |
| (g)ケヤキ | レベル=1.2 | レベル=0.06 | レベル=0.03, i=2~5 | 輝度ノイズ=0.03 |
| (h)クルミ | レベル=1.0 | レベル=0.266 | レベル=0.0975, i=2~7 | 輝度ノイズ=0.04 |
| (i)ウェンジ | レベル=0.2 | レベル=0.106 | レベル=0.01, i=2~8 | 輝度ノイズ=0.01 |

く、中間値を用いている。そのため、ゆらぎの特徴に合わせ、最適なバランスを探す必要がある。

今回の評価方法は相対的な方法なため、どの程度リアルなのかが評価できず、何に問題があるのかが分析できないため、今後あらためて適切な評価実験を行うことが課題である。

4.6.3 様々な樹種の特徴表現

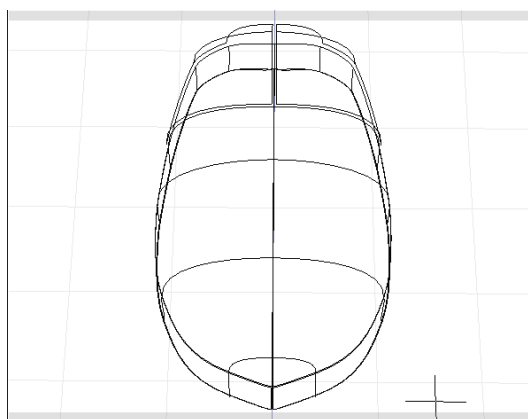
開発したシステムにより、様々な樹種の特徴表現を試みた。ゆらぎパラメータの値は、表4.2の計測平均値では樹種の特徴を満足に表現できないことがわかったため、試行錯誤で最適なパラメータの値を探すことにした。その参考とするため、追加で、6樹種のゆらぎの印象が実物とどのように異なるのかを、アンケートにより回答してもらった。調査した項目は、ゆらぎの振幅の大きさ、ゆらぎの周期の細かさの2点である。この結果を参考にしながら、試行錯誤でパラメータの再調整を行った。例えば、アカマツでは、骨格軸と年輪間隔ゆらぎを大きくし円周ゆらぎを小さくし、円周ゆらぎの周波数範囲を狭くした。スギ、ヒノキ、カラマツでは、骨格軸と円周ゆらぎレベルを大きくし、年輪間隔ゆらぎレベルを小さくした。スギでは、円周ゆらぎの周波数範囲を広くした。ケヤキでは、全てのゆらぎレベルを小さくし、円周ゆらぎの周波数範囲を狭くした。

官能計測を行っていない樹種3種は、実物サンプルを見ながら、パラメータを調整した。また、輝度ノイズや枝のパラメータも実物サンプルを見ながら、印象が近くなるよう設定を行った。この方法で作成したテクスチャ画像の合成例を図4.24に示す。用いた形状は、ベジエ曲面で表現した横：縦のサイズ比が1：2の平面である。図4.24のサンプル画像を作成する際に用いた各ゆらぎ要素のレベル等の設定値を表4.3に示す。

図4.24 (a)～(e)は、国内で多く用いられる一般的な針葉樹の例である。針葉樹は骨格軸のゆらぎが小さい。その中で、円周方向のゆらぎが比較的大きいのがスギである。(d)、(e)はカラマツの節の無い場合と節のある場合を比較してみた。節の有る無しにより、印象が大きく変化することがわかり、デザインの検討をする際には、節を表現できるかどうかことが重要であることがわかる。

図4.24 (f)～(h)は広葉樹の例である。広葉樹は骨格軸のゆらぎが大きく円周方向のゆらぎも針葉樹に比べると、少し大きい。そのため、年輪形状に大きなゆらぎが見られる。(g)のケヤキはゆらぎの周波数が低いことが特徴である。これらをパラメータで設定すると、広葉樹らしさやその樹種らしさが表現できた。

(i)はウエンジの表現例である。ウエンジは熱帯性のマメ科の樹種で、通直で規則的な年輪を持つ。ゆらぎを少なくすることにより、独特な色と相まって、特徴がよく表現されている。



(a) 作成した形状



(b) ヒノキ



(c) カラマツ



(d) ケヤキ

図4.25 CGアプリケーションとの連携によるシミュレーション例

パラメータの最適値を求める際に、今回用いたサンプル材は、サイズが小さく、最も特徴が現れる板目面が含まれていないサンプル材もあり、複数のサンプルがないと、平均的なイメージに近づけるのは難しい作業であることがわかった。

4.6.4 CGアプリケーションとの連携実験

市販CGアプリケーションのShade (ver.8.5) と本システムを組み合わせ、デザインシミュレーションの実験を試みた。

まずCGアプリケーションでマウスを想定した形状をベジエ曲面で作成した。木目をテクスチャマッピングする部分は曲面4グループで構成した。一つのグループは3枚のベジエ曲面からなり、縦横10×4個の頂点で構成されている。作成した形状のワイヤフレーム表示を図4.25 (a)に示す。

作成した曲面データは、各曲面グループ毎にDXF形式のベジエ曲面点群データとしてファイルに書き出し、このデータを本システムで読み込んだ。

入力された形状データをパラメータエディタのアフィン変換コントロールダイヤル群を操作して、適当な位置に配置した。配置に当たっては曲面の接続部分で模様が連続していることが確認できるよう配慮した。位置の調整後、最終的な解像度でテクスチャの合成を行った。テクスチャ画像の画素数は、CGアプリケーションによる最終的なレンダリングでのオブジェクトの表示サイズを考慮して、今回は512×512画素で生成した。生成したテクスチャ画像は、TIFF形式の画像ファイルとして保存した。

レンダリングには、モデリングを行ったのと同じShadeを使用した。それぞれの部品用に作成したTIFF形式のテクスチャ画像4枚を読み込み、それぞれオブジェクト内の対応する曲面グループにマッピングした。マッピングの方法は、曲面パラメータに画素を対応付ける「ラップ / uv」を用いた。さらに光源、カメラ等を設定し、最終的なレンダリングを行った。レンダリングの結果を図4.25 (b)～(d)に示す。(b)はヒノキ、(c)カラマツ、(d)はケヤキのカラーパターンを用いてテクスチャ画像を作成し、レンダリングした例である。

実験の結果、曲面上でのテクスチャが曲面の接続部分でも3次元的に連続しており、3次元形状との整合性は正しく表現されていることが確認できた。

4.6.5 結果の考察

樹種の表現において、本システムは樹種毎のカラーパターンや骨格の形状に基づく年輪形状、並びに節や心材／辺材の色変化を基に色を決定している。多くの樹種はこの方法でリアルな木目模様を生成できることが確認できた。また、複数の部品で構成される複雑な形状において、本システムにより別々に合成されたテクスチャ画像が良好に接続されることが確認できた。本システムは、木材製品のデザインシミュレーションにおいて、様々な樹種で比較検討することを実用的なレベルで実現することができた。

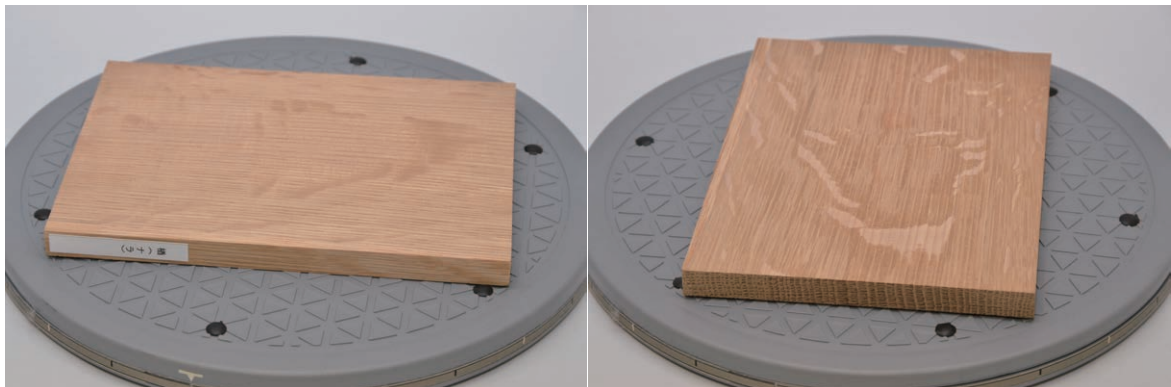


図4.26 ナラの異方性反射の例（見る向きで色や明るさが変化する）

その一方で、多数のパラメータの樹種ごとの最適値を求める作業は、困難が伴うことがわかった。サンプル材のサイズや切り出し位置に問題があったり、個体差が大きい場合もあり、最適な値を見つけるためには、サンプルの収集と実験に大きな労力が必要と考えられる。また、カラーパターンのサンプリングにおいて、サンプルの色を正確に測定することが、最終的に感覚に近い色でシミュレーション結果が得られることにならないこともわかった。現実の世界では、複雑な照明環境の中で用いられるものであり、本システムで単に拡散反射光の色だけをリアルに表現したテクスチャ画像ができたとしても、正確なシミュレーションができることにはならない。CGのレンダリングでの表面反射特性の設定次第では質感が異なってしまう可能性もある。リアリティの評価を行うためには、最終的に完成したシミュレーション結果を感性的に評価する必要がある。

また、一部の樹種では色パターンのみでは質感が表現できないことがわかった。例えば、モミやナラの木材では表面の微細な構造に起因する複雑な光の反射特性を持っており、見る向きにより色に変化する性質がある（図4.26参照）。樹木の中には、繊維の配向が通常の方角と直角方向に向いている縦状組織や放射状組織を多く有する種類がある。本システムでは、木材の表面の微細な組織構造まではモデル化していないので、モミのような異方性の光沢や、不均一な繊維の配向による複雑な反射特性を表現することができない。全ての樹種において高いリアリティを実現するためには、まず本システムで生成したテクスチャがどの程度のリアリティを有するのか、樹種ごとに感性工学的な評価を行う必要がある。

4.7 結言

本章では、CGアプリケーションや3次元CADと連携して、3次元自由曲面の形状に整合したリアルな木目模様のテクスチャを生成し、木材製品のデザインシミュレーションのリアリティを向上させることができる汎用木目テクスチャ生成システムの概要について述べた。このシステムでは、様々な樹種の特徴的な木目模様を自然の木材から部材を切り出すのと同様の方法で表現することができる。また、汎用的なシステムであるため、様々なCGアプリケーションに適用することができる。本システムは特に、カラマツ間伐材など節のある材料を用いる用途や壁面に多数の部材を用いるような建築物のシミュレーション、家具など複雑な形状を有する製品のデザイン検討、樹種の選択の検討などで大きな効果が期待される。

樹種の特徴表現は、自然の木材からサンプリングした年輪のカラーパターンと年輪形状のゆらぎの特徴を再現するパラメータの最適化により、実現できることを示した。今後は、さらに多くの樹種について、最適化を図っていきたい。

第5章

結論

第5章 結論

5.1 本論文で得られた成果

5.1.1 曲線骨格モデルの導入による成果

桃井が開発した従来の直線骨格モデルによる木材の質感表現技術は、骨格軸を複数のノードで定義し、直線で結んで表現していた。この方法では骨格軸の付近で年輪パターンが直線的になってしまうという短所と、ノードの周辺部分において、年輪パターンを滑らかに接続するための処理の中で、特殊な条件の元で年輪が不連続な領域が生じてしまうという問題が明らかとなっていた。

本研究では、この二つの問題を、骨格軸を自由曲線で表現することにより解決した。この方法では、これまでと同じ骨格軸データから、各ノードを通るベジエ曲線を自動生成し、この曲線骨格軸からの水平距離から成長経過時間を求め、年輪カラーパターンのルックアップテーブルの対応位置から色を参照して画像化する。これにより、骨格軸が非常に滑らかな形状となり、骨格軸に近いエリアにおいても、これまでよりも滑らかな年輪パターンを生成することが可能になった。

また、従来法では骨格軸の接続エリアの外側で年輪が不連続になってしまう領域が生じてしまったが、曲線骨格モデル法では完全に3次元連続な年輪を生成可能になった。これにより、自然の年輪の形状に近づけることができた。

曲線骨格モデルでは、これまでの直線骨格モデルで用いていた骨格ノードの座標データをそのまま用いて、自動的に曲線骨格データを生成することができるため、変換のための作業は何も必要ない。また、レンダリングに要する時間も従来よりわずかに短縮することができた。

5.1.2 年輪パターンのゆらぎモデルの導入による効果

本研究では、自然の樹木に見られる年輪形状のゆらぎの発生をモデル化し、従来の木目模様生成技術に組み入れることにより、これまでより自然な木目模様を合成することができるようになった。自然の樹木の骨格形状や年輪形状に含まれるゆらぎ成分を分析し、 $1/f$ ゆらぎに近いゆらぎであることを明らかにすることができた。そして、このゆらぎをシミュレーションするためのゆらぎ関数を提案した。このゆらぎ関数を用いて、自然の年輪パターンのように多様なバリエーションを持った年輪パターンを生成できることを示した。

この方法がゆらぎのない年輪パターンや従来法によるゆらぎを含んだ年輪パターンよりもリアリティが高いかどうかを評価するため、一対比較法によるリアリティの計測を行い、新しいゆらぎ生成法が統計的に優位であることを確認することができた。

本研究で提案したゆらぎモデルは、年輪形状のゆらぎを、(1)骨格形状のゆらぎ、(2)年輪間隔のゆらぎ、(3)円周方向の年輪形状のゆらぎの三要素で表現することを特徴とする。この手法を用いて、実際に合成した画像がこれまでよりもリアリティが向上しているだけでなく、ゆらぎのパラメータと最終的なゆらぎの変化が感覚的に結びつけやすいため、結果として求めているゆらぎのイメージを操作者が直感的にコントロールできることが確認できた。デザイン工程における、シミュレーションがより簡単に行えるようになることが期待できる。

5.1.3 汎用木目テクスチャ生成システムの開発

第2章、第3章で述べた技術開発により、従来よりも自然の木材の樹種ごとの特徴をよりリアルに表現することができる手法の骨格を構築できた。これをデザインの実務の中で活用するためには、ユーザがより活用しやすい環境を整える必要がある。昨今のCGアプリケーションは非常に高度な機能を備え、また用途に応じて特色ある製品が多数市販されている。これらのCGシステムと連携して活用できるシステムが理想的である。

本研究で開発した汎用木目テクスチャ生成システムは、市販の3D-CADやCGアプリケーションが持つモデリング機能やレンダリング機能を活用しながら、木材のリアルなテクスチャを合成する機能を付加することができるシステムであり、非常に汎用性が高い。各アプリケーションのプラグインツールではなく、汎用的なシステムであることは、応用分野を限定しないという点で有用であると考えられる。

5.1.4 市販CGアプリケーションとの連携

実際にCGアプリケーションのShadeと組み合わせて画像の合成実験を行い、簡単な操作で、リアルなシミュレーションが行えることが確認できた。また、3次元的に整合性のある木目模様がシミュレーションできることが確認できた。

5.2 今後の展望

本研究の最終的な目標は、樹種ごとの木目模様をリアルに表現できることであるが、そこに至るためには、いくつかの課題が残されている。

まず、年輪カラーパターンのサンプリングにおいて、より正確な色とパターンをデータベース化する必要がある。これまでスキャナにより現物をスキャニングする方法や、デジタルカメラによる方法を用いてきたが、スキャナによる読み込みではラインセンサとラインLEDによる読み込みに方向性があるため、サンプルの木材の向きによって、反射光の強さが変化してしまい、色味が正確に読めないという問題がある。それに対してデジタルカメラによる撮影では、反射光のコントロールが可能であり、比較的正確に読み込めることがわかっているが、照明光の色やカメラ側のホワイトバランスを厳密に色補正する必要がある。また、異方向性反射のある樹種では、光源の向きで色が変わる現象がでてしまう。結局、最後に肉眼による色補正を行わないと、感覚的に異なった色になってしまう樹種が多い。最適な色のサンプリング方法は、まだ試行錯誤が必要である。

年輪パターンの自然なゆらぎを表現するためのゆらぎモデルができたが、実際に樹種ごとのゆらぎパラメータの最適値の決定がまだできていない。そのため、樹種の特徴が正確に表現できる段階には達していない。今後、人間の感覚により最適な設定を確定していく必要がある。

木材が実際に様々な製品に加工される過程を考えると、表面に何も加工がされないケースというのは、非常に少ないことがわかる。多くの場合はクリア塗装あるいは有色塗装により、表面の保護とつや出しが行われる。本システムで用いている樹種ごとの年輪カラーパターンは、無垢の木材サンプルから取り込んだものである。表面に加工された製品のシミュレーションには、そのままでは使用できない。様々な塗装加工を想定したシミュレーションを行うためには、実際に用いられる加工をサンプル木材に施した上で、年輪カラーのサンプリングを行えばよいが、時間と労力がかかってしまう。様々な表面加工によりどのように表面の性状が変化するかをモデル化できれば、その手間を省くことができる。また、デザイン的な効果も考慮した表面の加工方法の検討に用いることもできる。今後、塗装による色や質感の変化にも対応できるように本システムを改良していきたい。

これらの課題を解決した上で、実際に誰が見ても樹種を認識できるかどうか、評価実験を行っていきたい。

参考文献

- (1) 農林水産省大臣官房統計部：平成26年木材統計，農林水産統計(2015/4/17).
- (2) 公益社団法人日本ユネスコ協会連盟：世界遺産詳細法隆寺地域の仏教建造物，
www.unesco.or.jp/isan/list/asia/horyuji/ (accessed 2015-05-02).
- (3) 前川英一：木はどのように利用されてきたか，木のひみつ，京都大学木質科学研究所，pp.112-122 (1995).
- (4) 村山忠親：日本で手に入る木材の基礎知識を網羅した決定版原色木材大事典170種，誠文堂新光社，pp.215-218 (2008).
- (5) 増田稔：木目はなぜ「なごむ」のか，もくざいと科学，日本木材学会，pp.46-51 (1994).
- (6) 仲村匡史：木材の見えと木質内装，木材学会誌， 58， 1， pp.1-10 (2012).
- (7) 仲村匡史，増田稔，平松靖：木材及び自然石の素材イメージに寄与する視覚的要因，木材学会誌， 40， 4， pp.364-371 (1994).
- (8) 仲村匡史，増田稔：まさ目パターンの濃淡むらの視覚特性，木材学会誌， 41， 3， pp.301-308 (1995).
- (9) 仲村匡史，増田稔，稲垣真由美：木質壁面のパネルの心理的イメージに及ぼす節およびグルーブの影響，木材学会誌， 39， 2， pp.152-160 (1993).
- (10) 深澤和三：樹体の解剖 しくみから働きを探る，p.34，海青社 (1997).
- (11) 木の研究会：世界で一番くわしい15木材，pp.14-17 (2012).
- (12) 村山忠親：日本で手に入る木材の基礎知識を網羅した決定版原色木材大事典170種，誠文堂新光社，pp.3-165 (2008).
- (13) 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).
- (14) 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).
- (15) David, S. Ebert, 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，ボーンデジタル(2009).

- (16) Blinn, J. F. and Newell, M. E.: Texture and Reflection in Computer Generated Images, Comm. ACM, Vol.19, No.10, pp.542-547 (1976).
- (17) Peachey, D. R.: Solid Texturing of Complex Surfaces, Computer Gr., Vol.19, No.3, pp.279-286 (1985).
- (18) 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).
- (19) 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, 1293-1298 (2010).
- (20) 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).
- (21) 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).
- (22) 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).
- (23) Marschner, S. R., Westin, S. H., Arbree, A., Moon, J. T.: Measuring and Modeling the appearance of finished wood, ACM SIGGRAPH 2005, pp. 727-734 (2005).
- (24) 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).
- (25) 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).
- (26) 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).
- (27) 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).
- (28) 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).
- (29) 武者利光：ゆらぎの発想 1/fゆらぎの謎にせまる, NHK出版, pp.12-63, 1994.
- (30) 穂積訓, 稲垣照美, 渡部濃：虫の音が人の感性に及ぼす影響, 日本感性工学会研究論文集, 7, 1, pp.119-126, 2007.
- (31) 泉哲也, 服部哲郎, 藤田笑美子, 杉本峻一, 川野弘道：カラー画像におけるゆらぎ値算出随伴量と感性的印象, 日本感性工学会論文誌, 9, 2, pp.243-250 (2010).

- (32) 山田光宏, 井上裕貴, 野月悠平, 大和田祥平, 金沢文恵, 中村雅人: カオス性の異なる1/fゆらぎを用いた拍手のアニメーションの感性評価, 日本感性工学会論文誌, 12, 3, pp.389 -396 (2013).
- (33) 桃井貞美, 高寺政行: 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, 情報処理学会論文誌, 55, 9, pp.2225-2234, 2014.
- (34) 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, 40-2, pp.9-16 (1989).
- (35) 青山英樹, 盛拓也, 菅原健次: 木目模様の創成方法, 公開特許公報, 特開2012-198583 (2012).
- (36) Gardner, G.: Simulation of natural scenes using textured quadric surfaces. Computer Graphics (SIGGRAPH'84 Proceedings), 18:11-20 (1984).
- (37) Gardner, G.: Visual simulation of clouds. Computer Graphics (SIGGRAPH'85 Proceedings), 19(3): 297-304 (1985).
- (38) 長沢伸也, 川栄聡史: Excelでできる統計的官能評価法, 日科技連出版社, pp.206-217 (2011).
- (39) AutoCAD 2012 DXF Reference, Autodesk Inc. (2011), available from < http://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2012_pdf_dxf-reference_enu.pdf> (accessed 2015-05-02).
- (40) 桃井貞美, 高寺政行: CGソリッドテクスチャリングへの年輪形状ゆらぎ発生モデル導入によるリアリティの改善効果, 日本感性工学会論文誌, 14, 3, pp.351-359 (2015).
- (41) 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, CG-ARTS協会, pp.235-237(2009).
- (42) 深澤和三: 樹体の解剖 しくみから働きを探る, pp.70-78, 海青社 (1997).

本論文に関する発表論文等

審査付発表論文（レフェリー制のある学術雑誌）

- (1) 桃井貞美, 高寺政行：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, 情報処理学会論文誌, Vol.55 (No.9) , 2225頁～2234頁 (2014年9月発行に掲載).
- (2) 桃井貞美, 高寺政行：CGソリッドテクスチャリングへの年輪形状ゆらぎ発生モデル導入によるリアリティの改善効果, 日本感性工学会論文誌, Vol.14 (No.3) , 351頁～359頁(2015年8月掲載).
- (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) , 461頁～467 頁(1994年5月掲載).

審査なし発表論文

- (1) 桃井貞美, 小山貴雅：ベジエ曲面に対応した木目ソリッドテクスチャの合成手法, 平成23年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, Po2-41頁(2011年9月掲載).
- (2) 桃井貞美, 高寺政行：自由曲面に対応した汎用木目テクスチャジェネレータ, 長野県工科短期大学校紀要 No.18, pp.21-28 (2015年9月掲載).
- (3) 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年掲載).

謝辞

本論文をまとめるにあたり，その機会をお与え頂くとともに，本論文の作成及び研究の推進に際して多くのご教授を賜り，また終始かわらぬ激励と懇切丁寧なご指導，そしてご鞭撻を賜りました信州大学国際ファイバー工学研究所 高寺政行教授に対し，謹んで深く感謝申し上げます。また，上條正義教授，乾滋教授には副指導教官としてご指導をいただきましたことを，心より感謝申し上げます。

本論文の審査において，貴重なご助言を賜りました信州大学繊維学部 吉田宏昭准教授，岩手県立大学 布川博士教授に深く感謝申し上げます。在学中ご指導いただいた信州大学工学部 新村正明准教授に深く感謝申し上げます。

信州大学大学院に入学するきっかけを与えていただき，在学中は常に励ましをいただき，また貴重なご助言をいただいた，長野県工科短期大学校 藤井恒男校長，目黒秀明副校長（当時），中村正幸副校長に謹んで深く感謝申し上げます。また，在学のために公私両面で私を支えてくださった長野県工科短期大学校情報技術科 野瀬裕昭准教授を始めとする情報技術科教員の皆様，長野県工科短期大学校全教職員の皆様に深く感謝申し上げます。

本論文の基礎データづくり，実験に御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諸君に，深く感謝申し上げます。

木材サンプルをご提供いただいた，長野県林業総合センター吉田孝久様をはじめとする同センター職員の皆様に，深く感謝申し上げます。

そのほか，ここに挙げることができない多くの方にお世話になりましたこと，深く感謝申し上げます。

最後に，私生活において常に私を励まし支えてくれた 妻 桃井令子，父 桃井貞治，母 桃井久美子，子供達，そして親戚一同に心より感謝します。

平成 27 年 9 月 桃井貞美