

背景画における陰影付け技法に基づく アニメ制作のための樹木の色域別レンダリング

赤木 康宏^{†1} 片瀬 満則^{†2} 北嶋 克寛^{†1}

本研究では、アニメ制作に用いる、背景画と呼ばれる絵画における樹木の陰影付け技法に着目し、任意の作風を持つ背景画を生成することのできる Non-Photorealistic Rendering 手法を提案する。アニメ制作では、背景画と呼ばれる風景などを描いた 1 枚の絵画に対して、登場人物などの動きを表現する複数のレイヤを合成することで 1 つのシーンを構成する方法が一般に用いられる。背景画は作品の印象を決定づける重要な要素であるが、樹木を含む自然景観が背景となる作品の制作過程においては、扱う対象の量や形状の複雑さなどから、すべてを人手で行えば膨大な作業を必要とする。本論文では、絵筆により樹木を描画する際の手順を分析し、葉の配色および陰影付けが画家固有の作風を決定する主要な要因の 1 つであることを示し、CG で用いられる樹木モデルの持つ様々な情報（葉の位置および法線、枝の接続関係、枝につく葉の集団の重心など）に基づき、各色の占める領域を容易に制御できる新たな手法を提案する。これにより任意の作風を持つ背景画を生成することが容易になる。色域の制御に関しては、背景画において広く用いられる、詳細形状の簡略化、空気遠近法などの描画技法に基づき、5 種類の制御関数を提案する。著者らが開発した写実的な「風に揺れる樹木のアニメーション生成システム^{1),2)}」に本手法を適用し、豊かな動きを持つ背景画の自動生成を可能にした実例を示す。最後に、本手法に基づくアニメーション生成を行い、任意の作風を持った映像の生成が可能であることを比較実験などにより検証する。

A Color Region Based Rendering of Trees Based on Shading Techniques of Background Art in Animation

YASUHIRO AKAGI,^{†1} MITSUNORI KATAAMA^{†2}
and KATSUHIRO KITAJIMA^{†1}

In this paper, we describe a non-photorealistic rendering (NPR) framework for generating background art in animation. The background art, in many cases that is a Landscape Painting, is generally used in animation productions. One background art and multiple layers of moving characters compose a scene. The background art is one of most important factor for making the impression of an animation. We propose, in particular, a NPR technique that can reproduce painting techniques characteristic of background art such as leaf painting based on just a few colors, shading to produce a spherical effect, and aerial perspective. This technique can generate dynamic background art having a swaying motion in the wind by applying the animation generation tool for swaying trees developed by the authors^{1),2)}. The proposed method, in contrast, is based on a painting technique for background art, which enables it to pick up features of the target work of art and to reproduce its style.

1. はじめに

近年のアニメ制作では、様々な制作支援ソフトウェアの導入が行われており、制作工程のデジタル化が進行している。たとえば、豊かな動きを持つキャラクターの動作および表情変化の作成、あるいは多くのオブジェクトを含む自然景観の作成などにおいて、手書き

による制作を行う際に高度な熟練と膨大な作業を必要とする対象物について、デジタル化を行うことに大きな関心が寄せられている。しかし、自然景観を対象とする際には、樹木や草原などの自然物の形状生成に加え、風などの自然現象による複雑な動きを生成する必要があり、ソフトウェアによる制作の自動化には多くの課題が残されている。

一方、CG による自然景観の写実的な表現については古くから様々な研究が行われている。Lintermannらの研究³⁾では、分枝規則や葉の付き方、花の形状などを、インタラクティブな操作によって作成できる

^{†1} 東京農工大学
Tokyo University of Agriculture and Technology

^{†2} カシオエンターテイメント株式会社
Casio Entertainment, Inc.

ツールを開発した．千葉らの研究⁴⁾では、架空の植物ホルモンを用いることで、種に固有の生長特性をシミュレートし、自然な樹幹形成を可能にした．また、生成される樹木形状をより本物に近づける工夫として、生長シミュレーションを用いた研究も行われている⁵⁾．著者らは、写真立体復元により得られた形状データを統計学に基づき分析することで、種の特徴と自然な多様性を兼ね備えた樹木形状の自動生成を可能にする研究を行った¹⁾．このような樹木形状の自動生成に関する研究とは別に、樹木モデルを用いて、風の影響による揺れのアニメーションを生成することを目的とする研究^{6)–10)}も行われている．著者らは、樹木を対象とする風の物理シミュレーションを高速化するために、境界条件マップ法と呼ばれる手法を提案し、リアルタイム性のある風に揺れる樹木のアニメーション生成を可能にする研究を行った²⁾．

一方、アニメ制作にCGを利用する際には、写実的な表現よりも、非写実的な表現を持つ、制作者の望む任意の作風を実現するアニメーション生成技法が強く求められる．近年、このような非写実的なレンダリング技法(Non-Photorealistic Rendering: NPR)に関する研究^{11)–16)}もすでに行われている．Coconuらの研究¹⁷⁾では樹木を含む自然景観に対して、輪郭の複雑さや、葉の形状の複雑さを制御することにより、ペンによるスケッチ風のレンダリングを可能にした．Luftらの研究¹⁸⁾では、葉の配置情報から、樹木を包絡する滑らかな陰曲面を生成することで、水彩画風のレンダリングを可能にした．これらの研究では、対象となる作風の特徴をとらえてはいるものの、特定の画家個人の特徴を再現することは難しい．一方、Changらの研究¹⁹⁾では、実在の絵画の配色を参照することで、写真画像を特定の絵画調に変換することを可能としている．しかし、対象物の抽象化など、形状変形に関する処理は行われておらず、作風を再現するには至っていない．以上のように、NPRに関する研究では様々なパラメータによって対象となる作風を近似することを目的としているものが数多くある．

本研究では、背景画における樹木表現に着目し、様々な作風を持つ背景画を生成することのできるレンダリング手法を、アニメ制作者の協力を得て開発し、その有効性を検証する．背景画において樹木を描く際には、樹木のシルエットおよび葉の茂り方を表現するために、葉を数色の絵具で塗り分けけることで陰影を表現するという特徴がある²⁰⁾．この風景画における樹木の特徴的な描画技法に着目し、CGにおける樹木モデルに対して、葉の色領域を容易に制御することのできる、陰



図1 枝の世代と葉

Fig. 1 Each generation of branches and leaf.

影関数と呼ばれる制御関数を導入することにより、一連のレンダリング手法を用いて任意の作風の生成が可能となることを示す．

2. 樹木形状モデル

本章では、レンダリング対象として扱う樹木形状モデルについてその概要を述べるとともに、レンダリング時に参照する各種パラメータについて述べる．著者らの先行研究¹⁾では、様々な種の樹木形状を少数のパラメータによって表現可能となるモデルを提案した．本樹木モデルは、幹を第1世代とし、分枝が生じるごとに世代が増し、第4世代の枝に葉を配置する、5階層の構造となっている(図1)．各世代の枝は、長さ、太さ、子の枝の数、分枝角度などのパラメータを持つ．各世代の枝および葉の配置は、植物形態学に基づく分枝の形態パターンを設定することにより自動的に求められる．本樹木モデルは、枝と葉の親子関係および世代の情報を持つことに特徴があり、3章で述べるレンダリング手法においても、この世代の概念が用いられる．

3. 樹木の色域別レンダリング手法

本章では、背景画に見られる特徴的な樹木の陰影付け技法である、葉の色域分割による塗り分けを行う手法について述べる．まず、3.1節において風景画に見られる樹木の描画技法について詳しく述べ、風景画中の樹木が複数の色の葉から構成されていることを示す．次に3.2節では本手法のレンダリング処理の流れについて述べる．3.3節では、各樹木パラメータに基づく葉の色域分割を実現する、陰影関数について述べる．3.5節ではアニメ制作に用いる際の工夫として、葉のコントラスト調整法について述べる．最後に、3.6節で各陰影関数に基づく出力結果の合成について述べる．

3.1 風景画における樹木の描画技法

絵筆を用いて樹木を描画する際には、立体感を表現するために陰影付けがなされる場合がほとんどである．本研究では、葉の茂りによって光が遮られ、他の葉の上に影を落とすことで生じる「陰」の部分のみを扱い、地面および枝などに落ちる「影」の部分は扱わ

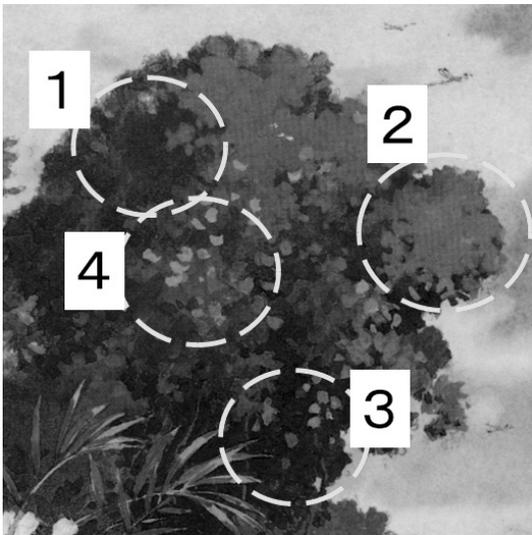


図 2 塗り分けの実例

Fig. 2 An actual example of color scheme.

ないものとする。葉に生じる陰の部分を描画する際には、明るさおよび色彩の異なる複数の色を用いて絵具を塗り重ねていく²⁰⁾。塗り重ねの色数、表現意図は様々であるが、一般的に次の要素が 1～数色含まれている(図 2)。

- 重ね塗りの下地となる基本色
- 光の当たる側の明るい色
- 鏡面反射成分
- 暗がり強調する、特に暗い色

これらの色の塗り分けは、実物の葉に生じる陰の連続的な輝度の変化を抽象化したものであり、色数および色彩などの違いによって作風が生じる。よって本研究では、異なる色の絵具による塗り分けおよび塗り重ねにより実現される葉の配色が、背景画において作風を作り出す主要な要因の 1 つであると考えられる。CG に用いられる樹木モデルに対して、この葉の配色を容易に制御することのできる陰影関数を適用することで、任意の作風を持つ樹木のレンダリングを行う。陰影関数による一連のレンダリング手法については次節以降で詳しく述べる。

3.2 陰影関数による葉の輝度値制御

本節では、葉の任意の領域分割を実現するために用いる、陰影関数と呼ばれる輝度値制御関数について述べる。CG を用いて葉の描画を行う際には、葉を構成する面の法線情報を用いてライティングを行い、最終的な面の色 (RGB 値) を決定し描画する方法が一般的である。本研究では、特定色の絵具によって塗られた領域を描画することを目的としているので、色の濃

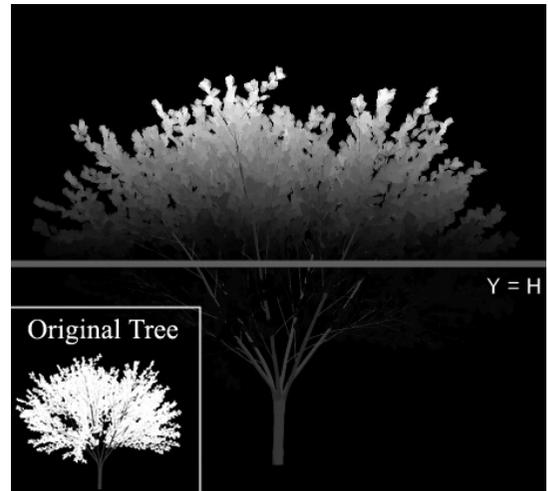


図 3 単純な陰影関数による塗り分け

Fig. 3 A rendering result of a simple shadow-function.

淡 (輝度値) を求める必要がある。そこで、それぞれの葉の持つ正規化された輝度値 (0.0 – 1.0) を面の法線に限らず、樹木モデルの持つ様々なパラメータを用いて制御し、グレースケール画像として結果を出力する。本研究では 5 種類の陰影関数を用いて葉の陰影を生成するが、本節ではある葉 (i) の地表からの高さ y_i のみをパラメータとする単純な陰影関数 $F(y_i)$ を示し、その効果について述べる。他の陰影関数の詳細については 3.4 節で述べる。

$F(y_i)$ は、樹高 $TreeH$ の樹木に対して、個々の葉の高さ y_i が H 以上の場合では高さに正比例した輝度値を持ち、それ以外は 0 を返す関数と定義する (式 (1))。

$$F(y_i) = \begin{cases} (y_i - H)/(TreeH - H) & y_i \geq H \\ 0 & y_i < H \end{cases} \quad (1)$$

黒い背景に対して陰影関数 $F(y_i)$ を用いて描画される樹木は、高さ H 以上の位置の葉のみが表示され、 H より低い葉は背景と同化し情報が失われる結果となる(図 3)。よって、描画される画像は高さ H を境界とする、上部ほど明るいグラデーションを持つ画像となり、この画像をマスクとし特定の色彩を割り当てることで、特定色域の塗り分けを行うことができる。

以上のように、陰影関数の持つパラメータを制御することによって、任意の色域の描画が可能となる。

3.3 枝の世代を考慮した輝度値合成法

3.2 節で述べた陰影関数に基づく特定色域に対するマスク画像の生成においては、葉の位置情報に応じて 1 つの輝度値を求めたので、樹木全体として緩やかな

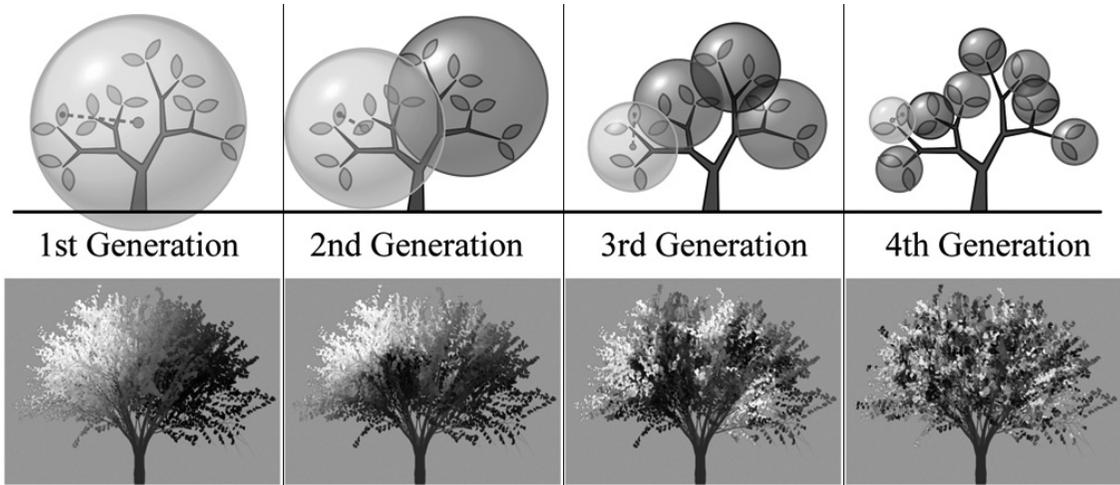


図 4 球状法線の世代と陰影付けの例
Fig. 4 A generation of hierarchical-sphere and each rendering results.

グラデーションを持つ結果となった。背景画における樹木では、カメラからの距離に応じて、近いものほど陰影の詳細度が高く、遠いものは大まかに表現されるという特徴がある。そこで、樹木モデルの持つ枝の世代を考慮することで、陰影の詳細度を制御する。制御は次の手順で行う。

- (1) 樹木モデルは 4 世代 ($g = 0 - 3$) の枝から構成されるので¹⁾、1 つの葉 (i) に対して 4 世代の親が存在する。そこで、各世代の枝の持つパラメータ群を陰影関数に用いて、世代ごとの輝度値 $B_{i,g}$ を求める。
- (2) 世代ごとに重み係数 W_g を掛け、線形結合した合計輝度値 BS_i を求める (式 (2))。このとき、すべての世代の W_g の和は 1.0 とする。
- (3) すべての葉における合計輝度値 BS_i の最大値 ($BMax$)、最小値 ($BMin$) を求め、式 (3) を用いて各葉の輝度値を 0.0 から 1.0 の範囲に正規化した値 BN_i を求める。

$$BS_i = \sum_{g=0}^3 B_{i,g} \cdot W_g \quad (2)$$

$$BN_i = (BS_i - BMin) / (BMax - BMin) \quad (3)$$

3.2 節で例示した陰影関数では、地表 (幹の根元) を高さ H の基準点と扱ったが、これは第 1 世代 (幹) の影響のみを考慮した陰影といえる。本節で述べた方法に基づき、世代ごとの付け根を基準とし、高さを考慮する処理を行うよう改良を加えることで、世代が進むほど細かい陰影の変化を生じさせることができる。また、重み係数を変化させることにより、陰影の詳細

度を自由に制御できる。

3.4 陰影関数の種類と制御方法

本研究では、樹木を描画する際に用いる陰影付けの手法を、アニメータの協力の下に分類を行い、次の 5 種類の陰影関数を定義した。それぞれの詳細について本節で述べる。

3.4.1 球状法線による陰影付け

背景画における陰影付けの代表例として、球形状の表面に生じるような丸みをおびた陰がある。樹木を描画する際にも、葉の集団によって生じる丸みをおびたシルエットを表現するために同様の表現が用いられることが多い。そこで、次の処理によって、球状に分布する仮想的な法線を求める。

- (1) ある世代 (g) における任意の枝 (j) からの分枝によって生じるすべての葉の位置から、重心位置 $\vec{G}_{j,g}$ を求める。
- (2) 重心位置 $\vec{G}_{j,g}$ から任意の葉 (i) の位置 \vec{L}_i に向かうベクトル ($\vec{V}_{i,j,g} = \vec{L}_i - \vec{G}_{j,g}$) を求める。
- (3) 正規分布 P により、距離 $|\vec{V}_{i,j,g}|$ に応じて重み付けを行い、各枝ノードにおける重心位置からの影響を合成することで葉の法線 $\vec{N}_{i,g}$ を求める (式 (4))。このとき、正規分布の範囲を、枝の付け根から末端の葉までの長さで制限することで、図 4 上部に示すような重心を中心とする枝全体を囲む輝度の分布が求まる。

$$\vec{N}_{i,g} = \sum_{j=0}^{\text{all branch}} \vec{V}_{i,j,g} \cdot P(|\vec{V}_{i,j,g}|) \quad (4)$$

- (4) 各世代の法線 $\vec{N}_{i,g}$ を正規化し、重み (W_g) を

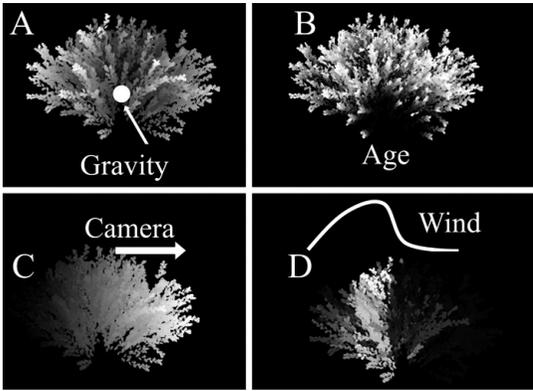


図 5 陰影関数の種類と効果
Fig. 5 Rendering result of each shadow-function.

用いて合成することで、葉の球状法線 (\vec{NC}_i) を求める (式 (5)).

$$\vec{NC}_i = \sum_{g=0}^3 W_g \cdot \vec{N}_{i,g} / |\vec{N}_{i,g}| \quad (5)$$

(5) 球状法線 (\vec{NC}_i) と光線ベクトル \vec{N}_{Light} の内積をとり、葉の輝度 BC_i とする (式 (6)).

$$BC_i = \vec{NC}_i \cdot \vec{N}_{Light} \quad (6)$$

図 4 上部に示すように、ある枝に属する葉の法線は、重心を中心とした球状に分布する結果となる。世代が進むに従い、1 つの球の半径は小さくなり複雑な陰影を作り出す (図 4 下部)。各世代の重み係数を変化させることで、陰影の滑らかさを制御することができる。

3.4.2 重心からの距離による陰影付け

樹木の中心部は、葉によって光が遮られるので、暗い色を用いて描画される場合がある。そこで、各世代 (g) の重心 G_g から葉 (i) までの距離 $|\vec{V}_{i,g}|$ を求め、世代ごとの最大の距離 ($MaxL_g$) に応じて正規化することで、葉の輝度値 BG_i を求める陰影関数 (式 (7)) を導入する。

$$BG_i = \sum_{g=0}^3 W_g \cdot |\vec{V}_{i,g}| / MaxL_g \quad (7)$$

図 5・A にその効果を示す。

3.4.3 枝の年齢による陰影付け

若い葉は、色の濃度が薄く表現されることがあるので、ある葉 (i) の枝の年齢 (Age_i) を正規化し、輝度値 (BA_i) とする陰影関数を導入する (式 (8))。本研究で用いる樹木モデルでは、若い枝は葉の数や分枝数が少ないという樹木の特性を考慮するために、仮想的

な枝年齢を設定している¹⁾。枝年齢は幹の年齢を 100 とし、分枝が起きるごとに枝の年齢を 1 ずつ減らすことで決定する。図 5・B にその効果を示す。

$$BA_i = Age_i / 100 \quad (8)$$

3.4.4 視点からの距離による陰影付け

風景画において、空気遠近法と呼ばれる手法が一般的に用いられている。空気遠近法は大気などの影響による光の拡散を考慮した描画技法であり、遠景の物体をぼかして描画することで立体感を表現する。この空気遠近法に基づく色の違いを扱うために、視点からの距離に応じた陰影付を行う。陰影関数 BD_i は、視点からある葉 (i) のすべての親世代 (g) の枝の重心 ($G_{i,g}$) までの距離 ($Depth_{i,g}$) を正規化し、輝度値とする。距離の正規化には、各世代の視点からの距離の最大値 ($MaxD_g$) および最小値 ($MinD_g$) を用いる (式 (9))。

$$BD_i = \sum_{g=0}^3 W_g \cdot (Depth_{i,g} - MinD_g) / (MaxD_g - MinD_g) \quad (9)$$

このとき、幹の世代 ($g = 0$) の距離 $Depth_{i,0}$ は、シーンに含まれるすべての樹木における距離の最大値および最小値を用いて正規化を行うことで、手前にある樹木と、奥にあるものとを異なる輝度で描画することができる。一方、第 2 世代以降の枝 ($g = 1 - 3$) の正規化は、親世代を共有する枝どうしのみで距離の最大値および最小値を求める。たとえば第 1 世代の枝では、幹 (第 0 世代) を共有する枝どうし、つまり 1 つの樹木内での距離比較しか行わないものとする。この関数は大樹および複数の樹木を含むシーンにおいて遠近感が強調される効果を持つ (図 5・C)。

3.4.5 樹木の運動に基づく陰影付け

自然界の樹木では、葉の表裏で色の濃度が異なる場合が多く、風などにより揺れる際には風の影響を強く受ける部分で濃淡の変化が見られる。アニメにおいても、樹木の表面に明るい帯を流すことで、風の運動を誇張する表現が利用されている。著者らの先行研究²⁾では、樹木モデルに対する周囲の気流の流れを高速に求めることができるシミュレーション手法を提案しているので、葉の受ける風力を容易に取得することができる。そこで、ある世代 (g) の葉 (i) およびその親世代の枝が受ける風速 ($VW_{i,g}$) を、シーンに入力される風速の最大値 ($MaxW$) で正規化し、重み (W_g) を用いて合成することで、輝度値 (BW_i) を求める陰影関数 (式 (10)) を導入する (図 5・D)。

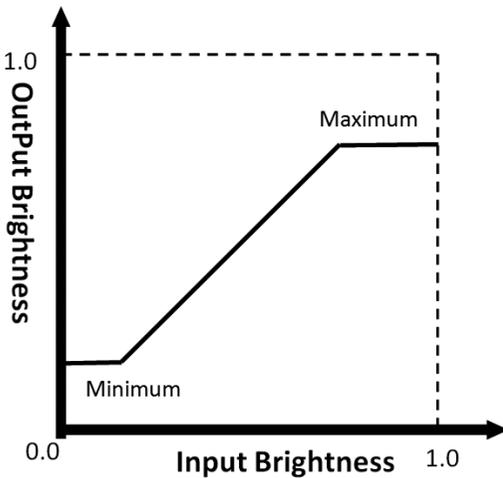


図 6 陰影関数の種類と効果

Fig. 6 A wind function for contrast control.

$$BW_i = \sum_{g=0}^3 W_g \cdot VW_{i,g} / MaxW \quad (10)$$

3.5 葉のコントラスト調整

アニメにおける陰影付けでは水彩画などに比べてコントラストが高いものがある。また、色域の境界付近の重なり方、ぼかし具合を調整するために、コントラストの調整機能を付加する。各陰影関数によって求まる葉の合成輝度値に対して、輝度変化の勾配および最大、最小値を設定し、コントラストの制御を行う(図6)。

3.6 マスク画像の合成

陰影関数により、特定色域に対するマスク画像の生成が可能となった。各マスク画像の合成処理の流れを以下に示す。

- (1) 各マスク画像に対応する色を設定する。
- (2) 各マスク画像を合成する順序を与え、最背面の画像から処理を行う。
- (3) 輝度値をアルファ値と見なし、設定した色との乗算を行い、得られたRGB値をアルファブレンディングによって合成する。

陰影関数に基づくマスク画像の生成および合成を行うことで、3次元の樹木モデルをもとに、ある作風を持った風景画のレンダリングが可能となる。具体的な作例による、マスク画像とその合成結果については5.2節で示す。

4. 葉の描画に対する工夫

3章で述べた手法では、葉の輝度値を制御することで、ある作者の風景画で用いられている色調を表現したが、葉の形状などの幾何的な情報には変化がなく、

形状自身は通常のレンダリング時と同様である。しかし、風景画では葉の形状自身も、絵筆による描画の制約などによって、自然界の樹木とは異なる点が多い。そこで以下の4.1節~4.3節において、葉の向きや大きさおよび透明度を制御することによる、葉の描画に関する工夫について述べる。

4.1 葉の向きの制御

風景画における樹木の葉は絵筆によって描かれるので、極端に細かい形状を描画することが困難であり、個々の形状は平面的であることが多い。これに対して、通常のレンダリング時の葉の向きは様々であり、形状が複雑に入り組んでいるという問題がある。そこで、葉を描画する際に葉を視点に向ける処理を行う。葉の向きの制御は、クォータニオンによる球面線形補間を用いて、過剰な回転を避けるために、葉の現在の表面あるいは裏面のうち、回転量の少ない面の法線ベクトルを視線ベクトルに向け回転させる。この処理を行うことで、平面的に描画された葉を表現できる。

4.2 運動中の葉の回転制御

本研究の手法は静止画に限らず、動きを持つ樹木に対しても同様の処理を適用するので、葉の位置および姿勢は連続的に変化する。4.1節で述べた葉の向きの制御を用いる際には、時間変化により葉の回転方向が変化し、葉のちらつきが生じるという問題がある。そこで、葉を回転させる方向を、初期姿勢において回転量の少ない面側に固定することで、時間変化による回転量を最小にでき、ちらつきを抑えることができる。

4.3 葉の大きさと透明度

4.1節で述べたように、風景画においては絵筆の制約により描画できる葉の形状の細かさに限界がある。特に遠景の樹木では、個々の葉の形状を描画することが困難であるので、空気遠近法と組み合わせ、葉の集団をぼかした膨らみとして表現することがある。この表現を近似するために、葉の大きさと透明度の制御を行う。遠景の樹木に対しては、葉のサイズを大きくし、透明度を増すことで、空気遠近法と同様の効果が得られる。

5. 実験

本章では実験により各種陰影関数によるレンダリングおよび葉の描画に対する工夫を行った結果を示すとともに、提案手法の有効性を検証する。

5.1 各陰影関数におけるレンダリング速度の比較

まず、各陰影関数を用いた際のレンダリングに要するフレームレートを計測する。陰影関数は、対象となる樹木の葉の枚数に比例して処理コストが増加するの

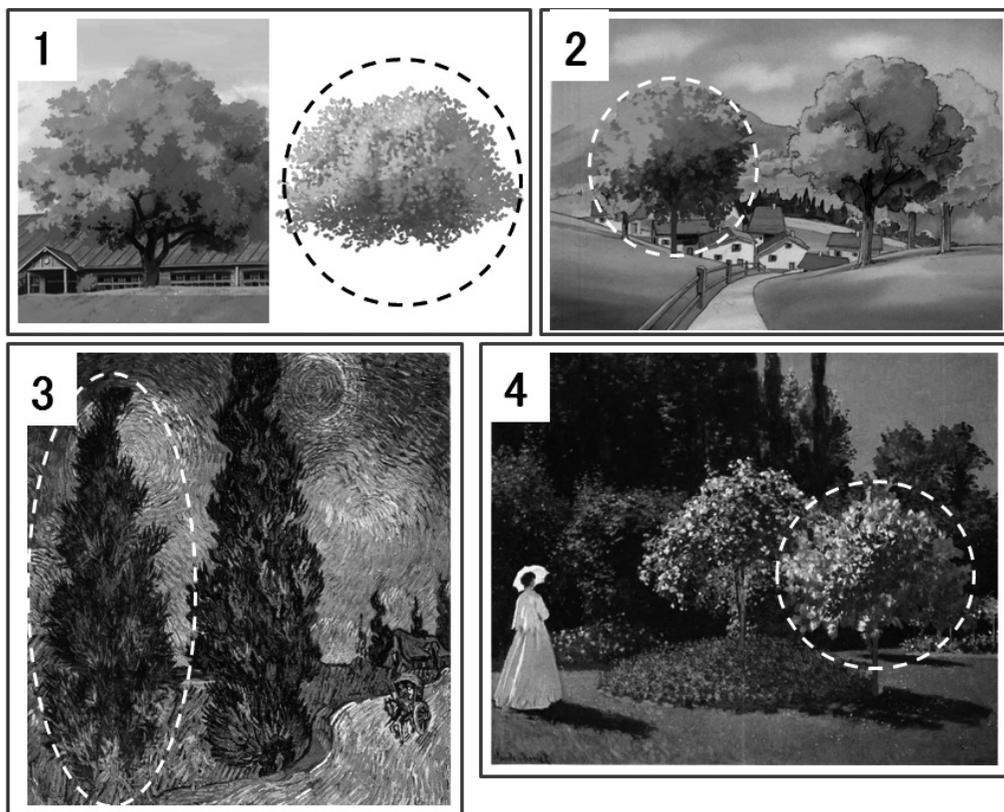


図 7 実際の作品との比較

Fig. 7 Comparison of artworks and our results.

表 1 実験環境

Table 1 Main specifications of experimental environment.

CPU	Core2Duo E6700
Memory	2 Gbyte
VGA	GeForce 7800 GT
OS	Windows Vista

で、葉の数が 1 万枚、3 万枚、6 万枚の 3 つの樹木モデルを用意し実験を行った。実験環境を表 1 に示す。

この際、樹木の変形はないものとし、葉および枝の重心位置は事前計算によりあらかじめ求めた値を利用した。また、比較のために、葉の法線と光線を用いた拡散反射光による陰影付けを行う場合、陰影付けを行わず単色で葉を塗りつぶした場合、およびすべての陰影関数を同時に適用した場合の計算結果についても計測を行った。結果を表 2 に示す。この結果から、陰影付けを行わない場合に比べ、球状法線で約 25%、すべての効果を適用した際には約 30% のフレームレートの低下が生じていることが分かる。また、拡散反射光の実行結果と比較した際の差は、すべての効果を適用した場合であっても約 10% となっており、速度低下が

表 2 各陰影関数を用いた際のフレームレート

Table 2 Results of frame-rate in each shadow function.

効果名	1 万枚の葉	3 万枚の葉	6 万枚の葉
拡散反射光	18.9	6.4	4.0
球状法線	16.4	5.8	3.8
重心距離	17.6	6.4	4.0
視点距離	17.5	6.6	4.1
年齢	17.2	6.6	4.6
風速	18.5	6.4	4.3
陰影なし	21.3	7.1	4.6
すべて	16.7	5.3	3.5

実用の範囲内に抑えられている。また、ここで示した実験結果はユーザが光源位置および世代間の重み、コントラストなどの調整を行った際に、樹木の陰影が更新されるまでの時間とほぼ等しい。

5.2 色域ごとのレンダリング結果および合成結果
 実際のアニメ 2 作品 (図 7・1²¹⁾, 2²²⁾) および絵画 2 作品 (図 7・3²³⁾, 4²⁴⁾) に対して、配色の分析作業を行い、同様の配色を持つ樹木の生成を行った。特に作品 1 では、アニメーション映画の CG による背景画制作の経験を持つ専門家が実験を行ったもので

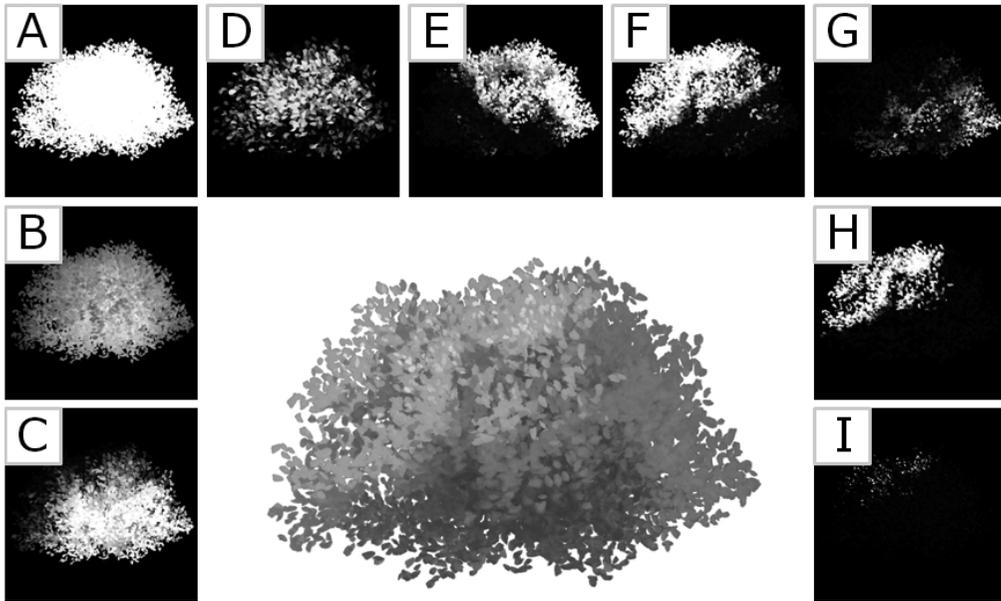


図 8 色域別レンダリングによるマスク画像と合成結果

Fig. 8 Mask images of each color and synthesized result.

ある．本手法により生成した樹木は，図 7 の点線で囲まれた部分である．作業は著者らの開発したツールによって行われ，実物の作品とインタラクティブに生成されるレンダリング結果を比較しつつ行い，それぞれの作品では作業には約 1~2 時間を要した．図 7 に対する評価について，作品 1 の制作を担当した者とは異なるアニメ制作者より次のような評価を得た．

“元画像の持つ個別の絵画スタイルに，見事に溶け込んでいる，という印象を持った．色味だけでなく，筆のタッチの形状やその分布の再現を行っている点を評価したい．ただ，枝や幹の陰影やマチエール（質感，テクスチャ）についてはいまだ表現されていないため，絵画として完成しているとはいえないが，単なる絵画の模倣にとどまらず，美術研究へ発展する可能性を秘めた手法だと感じた”．

以上の評価から，本研究で提案する陰影関数による，それぞれの作品に対する配色の再現という手法が有効であることが分かる．ただし専門家からの評価にもあるように，本研究では扱っていない幹や枝に関する陰影付けも，作品の品質向上のために重要であり，今後の課題としたい．また，作品 3 で見られる油絵具の凹凸が表現できないという問題もある．この問題は，葉に適用するテクスチャに法線マップを適用するなどの処理により改善できると考える．

次に，作品 1 で行った，塗り分けの例を示す．作品 1 では樹木を 9 色の塗り分けによって表現している

表 3 塗り分けの意図と色

Table 3 Intentions of color schemes and color values.

順序	表現意図	対応 RGB 値
A	地塗り	118, 165, 120
B	下部の影	24, 27, 29
C	内部の暗がり	3, 72, 68
D	黄色いアクセント	217, 221, 107
E	影側の濃い緑	86, 132, 95
F	光源側の濃い緑	89, 128, 89
G	影を強調する青緑	87, 126, 120
H	光源側の明るい緑	107, 171, 136
I	ハイライト	178, 225, 212

分析し，それぞれの色と塗り重ねの順序（A I, A が最背面）を次のように定めた（表 3）．各マスク画像と合成結果を図 8 に示す．この結果から，アニメ風の少数の絵具による葉の塗り分けが表現されていることが分かる．特に，3.4.1 項で述べた球状法線による葉の膨らみの表現が自然である．また，E~I のような樹木の一部分を切り出す処理を必要とする場合，3.5 節で述べたコントラスト調整機能が有効である．

制作者の望む作風を持つレンダリング結果を得るためには，主観評価によるパラメータ調整が必要となり，一定の時間を要する．しかし，本研究で提案する陰影関数などによる，背景画の陰影付けのパラメータ化により，これまで制作に膨大な時間を要した，風に揺れる動きを持つ樹木アニメーションの生成をはじめとし，樹形の変更，追加，光源位置の変更，視点位置の変更



図 9 並木道のシーン例

Fig. 9 A scene of the avenue of trees.



図 11 樹木の実写画像

Fig. 11 A photographed image of trees.

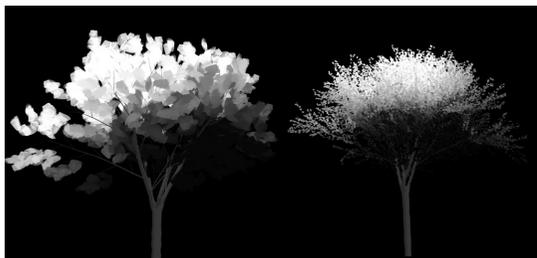


図 10 最前と最後の樹木の比較

Fig. 10 Comparison of tree shapes between nearest and farthest one.



図 12 写実的な配色によるレンダリング結果

Fig. 12 A rendering result by photorealistic color scheme.

などの、制作中に生じるシーンの再構成などを短時間で行うことができるという利点がある。

5.3 カメラからの距離を考慮したシーン

並木道のような、樹木が近景から遠景にわたり連続的に配置されているシーンでは、手前の樹木ほど精細に、奥ほど大まかに描かれるという特徴がある。そこで、3.2 節で述べた、世代を考慮した陰影の詳細度の制御および 4.3 節で述べた葉の大きさの制御を用いて、並木道のシーンの生成を行った(図 9)。図 11 の実写画像でも樹木の陰影は距離に応じて徐々に大まかなものに変化していることが分かる。また、葉をカメラに向け回転させる処理を用いることも、形状の複雑さを軽減させる効果がある。比較のためシーン中の最前の樹木と最後のものを同じ位置に配置した結果を図 10 に示す。本研究で提案する手法により、アニメで用いられる遠近感を表現する手法が再現できた。

5.4 実写画像への近似

実写画像(図 11)を参照し、連続的な変化をする陰影を主観により 6 段階に分類し、本手法によりレンダリングを行った結果を図 12 に示す。実写画像に比べ、鏡面反射の強調、葉の個体差による微細な色の変化の省略、葉のサイズの増大などが見られる。しかし、樹木全体にかかる陰影は実写画像との差は少なく、単純な陰影の変化は樹形の印象をより鮮明にしているとい

う特徴がある。よって、遠方の樹木に関しては、写実的な陰影付けにも本手法が対応可能であるといえる。

6. おわりに

本研究では、アニメ制作の際に用いられる背景画中の、樹木の陰影付け技法に着目し、任意の作風を持つ背景画を生成可能とする手法を提案した。特に、5 種類の陰影関数を用いることにより、葉の陰影を容易に制御し、背景画における特定色域の塗り分けを可能とした点に特徴がある。また、絵筆の特徴を考慮した葉の描画に関する工夫により、背景画に見られる遠近法の表現が可能となった。従来の樹木形状および風などによる揺れの生成手法に対し、一連の手法を適用することにより、複雑な動きを持つ背景画の生成が可能となった。最後に、各種実験により実際の背景画および実写画像との比較を行い、本手法の有効性を示した。

謝辞 アニメーションにおける樹木の描画技法に関して、制作者の視点から数多くのご意見をいただいた、株式会社スタジオジブリ CG 部の岩沢氏に感謝申し上げます。また、本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号 18300029「シュミレーションベースのアニメ製作支援ツールの包括的構築」

の支援を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 赤木康宏, 北嶋克寛: 統計的手法に基づく種の特徴を保持する樹木形状の生成手法に関する研究, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.5, No.J89-D, pp.1019-1035 (2005).
- 2) 赤木康宏, 佐波 晶, 北嶋克寛: 物理シミュレーションに基づく風に揺れる樹木のアニメーション, 情報処理学会論文誌, Vol.7, No.46, pp.1797-1809 (2005).
- 3) Lintermann, B. and Deussen, O.: Interactive modeling of plants, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.1, No.19, pp.56-65 (1999).
- 4) 千葉則茂, 村岡一信, 大川俊一, 三浦 守: CGのための樹木の生長モデル—架空の「植物ホルモン」による自然な樹形の生成, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.8, No.J76-D-II, pp.1722-1734 (1993).
- 5) Hart, J.C., Baker, B. and Michaelraj, J.: Structural simulation of tree growth and response, *The Visual Computer*, No.19, pp.151-163 (2003).
- 6) Giacomo, T., Capo, S. and Faure, F.: An interactive forest, *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation*, pp.65-74, Eurographics (2001).
- 7) Sakaguchi, T. and Ohya, J.: Modeling and animation of botanical trees for interactive virtual environments, *Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp.139-46, ACM Press (1999).
- 8) Perbet, F. and Cani, M.: Animating prairies in real-time, *Proc. 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics*, pp.103-110, ACM Press (2001).
- 9) Chiba, N., Kono, N., Sato, Y., Muraoka, K. and Saito, N.: Image generation method for swaying branches by wind, *Journal of IIEEJ*, Vol.5, No.27, pp.475-483 (1993).
- 10) Beaudoin, J. and Keyser, J.: Simulation Levels of Detail for Plant Motion, *Proc. SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp.297-304, ACM Press (2004).
- 11) 中川大介, 藤本忠博, 村岡一信, 千葉則茂: 水彩パース図風レンダリング法, 芸術科学会論文誌, Vol.1, No.2, pp.40-50 (2003).
- 12) 村上恭子, 鶴野玲治: パステル画風 CG 画像の生成, 芸術工学会誌, No.26, pp.108-113 (2001).
- 13) Raskar, R., Tan, K.-H., Feris, R., Yu, J. and Turk, M.: Non-photorealistic Camera: Depth Edge Detection and Stylized Rendering using Multi-Flash Imaging, *ACM Trans. Graph.*, Vol.3, No.23, pp.679-688 (2004).
- 14) Sykora, D., Burianek, J. and Zara, J.: Un-supervised colorization of black-and-white cartoons, *Proc. 3rd International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering*, pp.121-127, ACM Press (2004).
- 15) Markosian, L., Meier, B.J., Kowalski, M.A., Holden, L.S., Northrup, J.D. and Hughes, J.F.: Art-based Rendering with Continuous Levels of Detail, *1st International Symposium on Non Photorealistic Animation and Rendering*, pp.59-66, ACM Press (2000).
- 16) Olmos, A. and Kingdom, F.: Automatic non-photorealistic rendering through soft-shading removal: a colour-vision approach, *2nd International Conference on Vision Video and Graphics*, pp.203-208, Eurographics (2005).
- 17) Coconu, L., Deussen, O. and Hege, H.: Real-Time Pen-and-Ink Illustration of Landscapes, *International Symposium on Non-Photorealistic Animation and Rendering*, pp.27-35, ACM Press (2006).
- 18) Luft, T. and Deussen, O.: Interactive Watercolor Animations, *PG '05: Poster Proc. 13th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, pp.7-9 (2005).
- 19) Chang, Y., Saito, S., Uchikawa, K. and Nakajima, M.: Example-Based Color Stylization Based on Categorical Perception, *ACM Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, pp.91-98, ACM Press (2004).
- 20) 男鹿和雄: 男鹿和雄画集 II, スタジオジブリ (2005).
- 21) Staff, A.E.: *THE ART OF ONLY YESTERDAY*, 徳間書店 (1991).
- 22) スタジオジブリ: 井岡雅宏画集, 徳間書店 (2001).
- 23) Gogh, V.V.: Road with Cypress and Star (1890).
- 24) Monet, C.: Woman in the Garden (1867).

(平成 19 年 5 月 25 日受付)

(平成 19 年 12 月 4 日採録)



赤木 康宏 (正会員)

平成 13 年東京農工大学工学部電子情報工学科卒業。平成 18 年同大学大学院博士課程修了。平成 19 年同大学助教, 現在に至る。この間, 流体力学を用いた樹木アニメーションおよびアニメ制作支援システムの研究に従事。電子情報通信学会, 精密工学会の各会員。



片瀬 満則

平成 2 年 (株) リンクス (現, リンクスデジワークス) に入社。平成 4 年国際コンピュータグラフィックアート展金賞受賞。平成 7 年スタジオジブリ入社。「もののけ姫」「ホーホケキョとなりの山田くん」に CG アニメーターとして参加。「千と千尋の神隠し」「ギブリーズ episode2」「ハウルの動く城」「ゲド戦記」ではデジタル作画監督をつとめる。平成 19 年カシオエンターテイメント株式会社入社。



北嶋 克寛 (正会員)

昭和 46 年東京大学工学部精密機械工学科卒業。昭和 51 年同大学大学院博士課程修了。同年同大学助手。昭和 59 年東京農工大学工学部数理情報工学科 (現, 情報コミュニケーション工学科) 助教授, 平成 6 年同大学教授, 平成 16 年同大学学術・研究担当副学長, 平成 17 年同大学教授, 現在に至る。この間, 3D CAD, 3D ビジョン, CG, 画像理解等の研究に従事。精密工学会, 電子情報通信学会, 日本機械学会等各会員。