

紅葉のフラクタルシェーディングに関する研究

望月茂徳† 堀江大輔 蔡東生

筑波大学大学院 システム情報工学研究科

email: {mochi, horie, cai}@aoi3.cs.tsukuba.ac.jp

概要：秋の風物詩である紅葉は、景観コンピュータグラフィクス(CG)において自然な季節感を表現するために欠くことができない現象である。自然で趣のある紅葉発色は、空間および時間において複雑性を持ち、数多くの植物生理学的不確定要因を持つため、紅葉発色の複雑性を適切に再現した研究は見あたらない。本研究では、フラクタル頂上関数(Top Function)を用いて、樹木、葉の複雑構造を記号空間に写像することにより、空間および時間における複雑性を持った紅葉発色のCG表現方法について研究を行う。紅葉の発色部は葉部のみであるが、その紅葉発色進度は樹木中の各葉ごとに異なることから、紅葉を枝・樹木レベルと葉レベルに分け、各レベルをRIFS (Recurrent Iterated Function System)の記号空間に写像し、記号空間上で色関数を定義することにより、樹木全体を紅葉発色させる空間時系列アルゴリズムを提案する。

キーワード：景観CG, フラクタル, 反復関数系, L-system

Fractal Shading for Autumn Coloring

Shigenori Mochizuki† Daisuke Horie Dongsheng Cai

Graduate School of System and Information Engineering, University of Tsukuba

email: {mochi, horie, cai}@aoi3.cs.tsukuba.ac.jp

Abstract: An autumn coloring is essential natural phenomena for Computer Graphics (CG) to express seasonal impressions. Since natural autumn colorings possess both temporal and spatial complexity, few works study autumn coloring related to this complexity. We study a method preserves both temporal and spatial autumn coloring complexity using Fractal Top Function that maps the complex geometrical space of both trees and leaves to a code space. We propose the algorithm that progress autumn colorings including both the tree-level and leaf-level of autumn colorings using an RIFS (Recurrent Iterated Function System).

Keywords: landscape CG, Fractals, Iterated Function System, L-system

1. はじめに

¹樹木、葉の複雑な三次元構造中で、数多くの不確定な環境要因により発色する自然界の紅葉は、その高度な複雑性と美しさから多くの人を魅了

してきた。また、コンピュータグラフィクス(CG)において、自然な季節感を表現するためには、樹木の植物生理学的経時変化は欠くことのできない問題であり、現在に至るまで多くの提案[1][2][3][4]がされているが、適切にその複雑性を

† 2007年4月1日より立命館大学映像学部

再現したものはない。本論文では、フラクタル頂上関数(Fractal Top Function)[5]を用い、記号空間にその複雑構造を写像することで、より適切にシェーディングする手法を提案する。



図 1：葉の様々な紅葉発色



図 2：紅葉樹木の複雑な発色

2. 紅葉の発色機構と関連研究

落葉広葉樹の紅葉の色彩変化は、植物色素の配合比変化によってもたらされる。

例えば、カエデの紅葉の色彩変化は、葉中に含まれる植物色素であるクロロフィル（緑色色素）、カロチノイド（黄色色素）、アントシアニン（赤色色素）の配合比変化とその発色によってもたらされる。この配合比変化は、植物生理学的プロセスに関係している[6][7]。

夏期の熟緑葉では、葉中にクロロフィルとカロチノイドが 5:1~8:1 の割合で存在し、緑色が優位に発色する。図 3 に示される植物色素の大きな配合比変化は、初秋において葉の付け根に離層と呼ばれるコルク状の組織が形成されることをきっかけとして起こる。光合成によって作られた糖分の流出が離層によって妨げられ葉中に糖分が蓄えられる。同時に、クロロフィルの分解が始まり緑色が消失する。他方、黄色色素であるカロチノイドが残留し、黄色が発色する。さらに、葉中に蓄積された糖分がアントシアニンを合成し、葉が赤色に変化してゆく。

落葉広葉樹の紅葉発色にはその種類や樹齢、日射量、天候、気温、土壌成分、水分など多くの自然環境因子が影響を与える。しかし、発色の定性・定量的性質や、離層がどう形成されるかなど、未知の部分が多い[8]。葉の全部位や樹木全体に非一様に化学変化が起こるため、図 1、図 2 のように複雑な色彩変化が起こり、趣のある美しい紅葉発色が得られる。

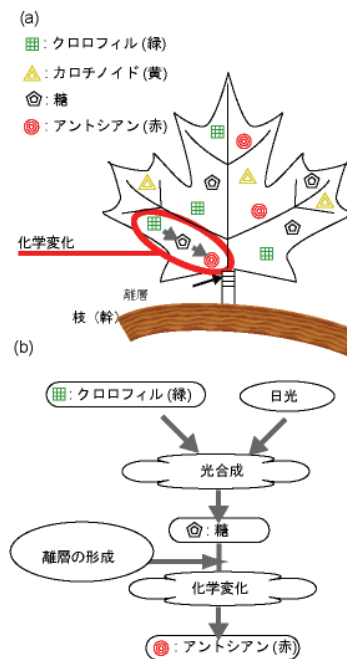


図 3：紅葉の植物生理学的メカニズム
石倉らは、実験から紅葉を 7 段階に分類し、カ

エデについて植物色素配合比の平均値を抽出した[8][9]. 千葉ら[1]は, 紅葉 CG において植物色素配合比から紅葉色を決定し, 葉の向日性を考慮した. クロロフィルの分解と糖分からのアントシアニンの合成が日射量と関係が深いことから早乙女ら[2]は“biological-based modeling”を提唱し, 村岡[3]ら, 望月ら[4]は葉や樹木が受ける日射量シミュレーションを行い紅葉進度を推定した. 累積日射量による葉や樹木間, 森林間の紅葉進度差により非均一な紅葉発色の時間・空間分布を求めた.

全く同じ日射量を受ける, 異なる同種の二本の落葉広葉樹があったとしても, それらの樹木は他の環境因子により異なる紅葉進度を持つ. 紅葉進度, 発色の度合を求めるため全ての天候や環境など全ての外的因子を考慮に入れてシミュレーションすることは不可能である. シミュレーションの代わりに, 特徴的なノイズを用いることが考えられる. しかし, 樹木構造は複雑であり, 特徴ある紅葉色, 色調をノイズによって生成することは困難である.

本研究では, 空間および時間に対して非一様かつ自然らしく変化する樹木の紅葉を擬似的に表現するために木構造を IFS(反復関数形: Iterated Function System)[10]で表現し, IFS に関連する記号空間構造を定義し, 記号空間上の番地から色値に写像する関数を定義する. これにより, 樹木構造と紅葉発色の複雑性を表現するフラクタルシェーディングを提案する.

3. IFS を用いた紅葉の CG

図 1, 2 に見られるように, 樹木は, 葉中, 樹木中に空間・時間色彩変化を持ち, その複雑性が季節感と美しさを与える. 発色部は葉部のみであり, その紅葉発色進度は樹木中の各葉部位によって異なるため, 以下, 枝・樹木レベルと葉レベルの

紅葉を分け, 再帰的に処理するアルゴリズムを考える.

① 枝・樹木レベルでは, 樹木内の葉々を, 全てが熟緑葉である紅葉の初期状態から紅葉の最終状態へ, 加齢による発色変化速度に差を持たせながら収束させるアルゴリズムを紹介し ② 葉レベルにおいて, 空間および時間において非一様に葉中で時系列発色するアルゴリズムを紹介する ③ 最後に, 「枝・樹木レベル」「葉レベル」を統合する時系列アルゴリズムを紹介する.

3.1 フラクタル頂上関数(Fractal Top Function)

反復関数系 (Iterated Function System: IFS) を

$$W := \{X; w_1, \dots, w_N\} \quad (1)$$

とする. 1 対 1 写像 $w_n: X \rightarrow X$ において $n=1, 2, \dots, N$ かつ全ての $x, y \in X$ に対して距離 d が $d(w_n(x), w_n(y)) \leq s \cdot d(x, y)$ を満たす最小の s を縮小係数といい, s は $0 \leq s < 1$ を満たさねばならない. 以下の式を満たす集合 A は一意の空でないコンパクト集合であり, IFS の不変集合と呼ばれる[10]

$$A = \bigcup_n w_n(A). \quad (2)$$

ここで, IFS に関連付けられる記号空間を Σ とする. この記号空間は N 種類の文字 $\{1, \dots, N\}$ に属する記号の無限列 $\{\sigma_k\}_{k=1}^{\infty}$ から構成される. ここで, $\sigma = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \dots \in \Sigma$ を Σ の要素とし, σ_k を $\sigma \in \Sigma$ の k 番目の記号とする. $\sigma, \omega \in \Omega$ に対して, 距離 d_Ω は (1) $\sigma = \omega$ なら $d_\Omega(\sigma, \omega) = 0$ (2)

$$d_\Omega(\sigma, \omega) = \sum_k \frac{|\sigma_k - \omega_k|}{2^k} \text{ と定義される. } \sigma_k \neq \omega_k$$

となる最小の番号 k とすると, Σ の要素の順序は

$$\sigma < \omega \text{ iff } \sigma_k > \omega_k. \quad (3)$$

で決定される. これは, 線形順序付け, もしくは,

辞書編集順序と呼ばれることもある。

ここで、 ϕ を記号空間 Σ からIFS不変集合 A への連続かつ上への写像 $\phi: \Sigma \rightarrow A$ とする。 ϕ はIFSに関連付けられた記号空間関数と呼ばれ、以下のように定義される

$$\phi(\sigma) = \lim_{n \rightarrow \infty} w_{\sigma_1} \circ w_{\sigma_2} \circ w_{\sigma_3} \circ \dots \circ w_{\sigma_n}(x_0). \quad (4)$$

ここで $x \in A$ である。式(4)で極限は点 $x_0 \in A$ に依存しない。点 $x \in A$ に対し、

$$\phi^{-1}(x) := \{\sigma \in \Sigma : \phi(\sigma) = x\} \quad (5)$$

は、一意の最大要素 $\tau(x)$ を持つ。この関数 $\tau(x)$

$$\tau: A \rightarrow \Sigma, \tau(x) = \max\{\phi^{-1}(x)\} \quad (6)$$

をIFSのフラクタル頂上関数(Top Function)とよぶ。 $\tau(x)$ はシフト不変(shift-invariant) [5]であり、 $\tau(x)$ を求める効率的な近似アルゴリズムが知られている。($\Theta = \{\sigma_2\sigma_3\dots \in \Omega : \sigma_1\sigma_2\dots \in \Theta\}$ であるとき部分集合 $\Theta \subset \Omega$ はシフト不変と呼ぶ)

IFSのフラクタル頂上関数ではその不変集合に色を与えることが可能であり、不変集合間で位相同型の関係を構築することが可能である[5]。本研究では、不変集合として葉、樹木を考え、フラクタル頂上関数 $\tau(x)$ で写像される記号空間 Σ 上でシフト不変性を用いることにより紅葉の経時発色を可能にする。現実には、CGで扱う場合記号空間番地 σ は有限であるので、ある一定回数のシフト操作で発色を収束させることができる。

3.2 枝・樹木段階のフラクタルシェーディング (Fractal Shading:FS):手法 I

樹木のモデリング手法としてよく知られるL-systemは、IFSに変換することができる[11].

L-systemからIFSの変換では、枝の分岐方法がIFSの縮小写像群に置き換えられる。例として式(7)の生成文法を持つL-system

$$\begin{aligned} \text{初期文字列} &: a(1) \\ \text{書き換え規則} &: a(s) : * \rightarrow \quad (7) \\ & F(s)[+a(s/R)][-a(s/R)][F(s)a(s/R)] \end{aligned}$$

は、次の縮小写像に変換される[11].

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1/R \cos \delta & 1/R \sin \delta & 0 \\ -1/R \sin \delta & 1/R \cos \delta & 0 \\ 0 & s & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1/R \cos \delta & -1/R \sin \delta & 0 \\ 1/R \sin \delta & 1/R \cos \delta & 0 \\ 0 & s & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1/R & 0 & 0 \\ 0 & 1/R & 0 \\ 0 & 2s & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Q_1 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, Q_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & s & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

縮小写像式(8)から式(11)のうち、式(8),(9),(10)は式(7)で表されるL-systemの書き換え規則における枝分岐記述からIFSに変換された枝の分岐写像であり、式(11)はL-systemの書き換え規則における枝伸長記述から変換された枝生成IFS写像である。従って、写像群 $\{T_1, T_2, T_3\}$ と写像群 $\{Q_1, Q_2\}$ をControlled IFS[11]として組み合わせることにより、図4左図の形状を得る。また、写像群 $\{T_1, T_2, T_3\}$ にそれぞれ{1,2,3}の記号を割り当てることにより、図4右図で示されるIFS記号番地を得る。式(12)で例示される三次元のタートル記号を用いた樹木のL-systemも同様にIFSに変換することができる。

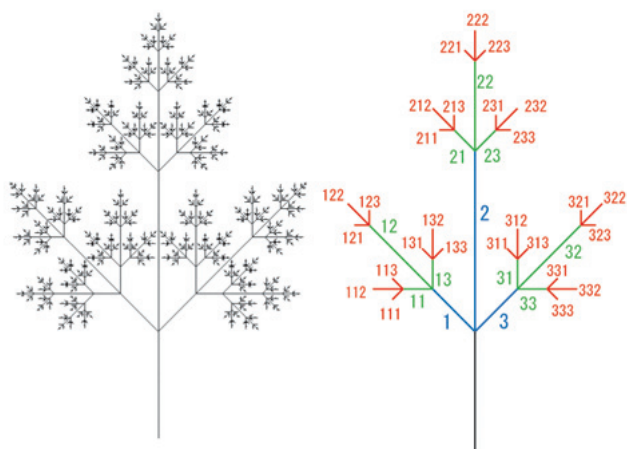


図 4 左図：IFS によって得られた樹木構造 右図：樹木構造に付随する記号番地

初期文字列: $a(20, 0.9)$

書き換え規則: $a(s, \lambda): * \rightarrow$

$$\begin{aligned} &!(\lambda)F(s)[\sqrt{(48)+(81.8)a(s/1.33, \lambda/1.64)}] \\ &[\sqrt{(40)+(197.2)a(s/1.34, \lambda/1.74)}] \\ &[\sqrt{(48)-(85.7)a(s/1.53, \lambda/1.74)}] \\ &[\sqrt{(28)a(s/1.33, \lambda/1.64)}] \end{aligned} \quad (12)$$

本研究では、樹木中の各葉位置を写像 $\tau(x)$ により、記号空間へ 1 対 1 写像する。枝分岐を表す縮小写像群 $\{T_1, T_2, \dots, T_N\}$ だけを用いた反復関数系を式(13)に定義する：

$$\{R^3 : T_1, T_2, \dots, T_N, p_1, p_2, \dots, p_N\} \quad (13)$$

L-system において樹木および葉を生成する場合、再帰的な分岐ステップを有限回実行し、最末端ノードを枝から葉に置き換える。記号番地を $\sigma = \sigma_1\sigma_2\dots\sigma_m\dots$ とすると、L-system を構成する再帰回数が M である場合、ある葉の記号番地 σ は $\sigma = \sigma_1\sigma_2\dots\sigma_M$ と表され、 $\sigma_{M+1}\sigma_{M+2}\dots$ 部分は丸め込まれる。3.1 節で示したように、記号番地定理[10]により記号空間 Σ から空間 R^3 へ上への写像 $\phi: \Sigma \rightarrow R^3$ が成立する。式(13)の IFS に関連

付けられる記号空間は、木空間から記号空間へ 1 対 1 に写像でき、フラクタル頂上関数 $\tau(x)$ により、記号空間上に番地から色値への写像を定義すると、樹木の複雑性をもった発色、シェーディングを行うことが可能である。式(13)の各縮小写像に関連付けられる記号は、 $\{1, 2, \dots, N\}$ であり、記号空間 Σ に対して、IFS

$$\{\Sigma : S_1, S_2, \dots, S_N, p_1, p_2, \dots, p_n\} \quad (14)$$

を得る。ただし、 S_i はシフト演算子であり、L-system の再帰的な分岐数を M とすると記号番地 $\sigma = \sigma_1\sigma_2\dots\sigma_M$ に対してシフト演算子は

$$S_i(\sigma_1\sigma_2\dots\sigma_M) = i\sigma_1\sigma_2\dots\sigma_{M-1}, i, \sigma_k \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (15)$$

と定義される。

式(15)を用い、ランダム反復アルゴリズム[10]により番地移動を続ける。ある番地をシフトすると、シフトされた番地からフラクタル頂上関数により対応付けられる樹木中の座標へシェーディングを決定する。このプロセスを繰り返し行うことによって、樹木全体の葉を紅葉させる。エルトンの定理[10]により式(15)のシフト操作は一様収束する。つまり、樹木上のすべての葉を初期状態から完全紅葉状態まで収束、すなわち発色させることができる。提案手法ではシフト操作により葉を順次発色させる。時間を細かく見たとき、シフト操作は系に対して、エルゴード的に空間を埋めていくので、一様に紅葉発色していくように見える。

各葉の加齢速度の差は、式(13)の確率 p_i により制御可能である。さらに、累積日射量による各葉間の紅葉進度差異は、シフト操作時に累積日射量により決まる重み値補正を施すことにより表現可能である。枝・樹木レベルの紅葉 CG の比較を

図 5,6 に示す. 図 5 では樹木中のある一枝が切り出されて表示され, 図 5 左図は, 望月ら[4]の日射量シミュレーションで得られる累積日射量マスクを表し, 図 5 右図では, その累積日射量値のみを用いて紅葉発色をさせている. 図 5 左図の累積日射量マスクは, 色が暗いほど累積日射量が少ないことを意味する. 枝の根元に近いほど, 紅葉が遅くなっている. これは, 枝の根元に近いほど他の葉により日射が遮られ, 累積日射量が減少するからである. 望月ら[4]などが行った累積日射量の実験では, 単に紅葉進度差異だけが得られ, 自然にばらつき, 徐々に, かつ一様に完全紅葉色に収束(全ての葉が紅葉)することはできない.

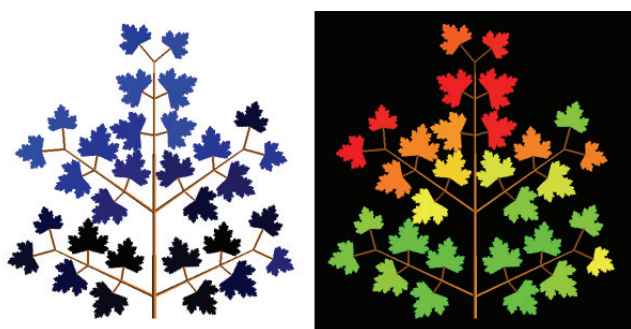


図 5 : 左図 累積日射量マスク 右図 : 累積日射量マスクのみを用いた紅葉

図 6 では本手法を用いた紅葉変化を, 図 5 と同じ枝葉を用いて示す. 図 6 の左右列は, それぞれ上から下に時系列が進むことを意味する. 図 6 左列は, 式(15)を用い, ランダム反復アルゴリズムを用いたフラクタルシェーディングによる時系列紅葉発色の図である. 各葉の紅葉変化速度の差異は, 確率 p_i を非均一にしたことによる. 図 6 右列は, 図 6 左列に図 5 左図で得られた累積日射量補正を行った場合の時系列紅葉発色である. 左右列を比較すると累積日射量差異から紅葉が遅れている葉が存在することがわかる.



図 6 左列 : シフト演算子を用いた紅葉の時系列変化, 右列 : 累積日射量によって補正されたシフト演算子による紅葉の時系列変化

3.3 葉段階のフラクタルシェーディング : FS 手法 II

3.2 節では, 枝・樹木構造の記号空間写像によるフラクタル頂上関数 $\tau(x)$ を用いた. 次に葉レベルでのフラクタル頂上関数を考えたシェーディングを行う.

本節では, 葉段階の紅葉発色に, カラーステールリング (CS: Color Stealing) 法[5]を用いる. CS 法は, 空間に分布する複雑色彩情報を記号空間に頂上関数 $\tau(x)$ で写像し, 複雑性を保存したまま, 別のフラクタル同型[5]記号空間に移す写像である. 本研究では, CS 法を用いて, 実際の紅葉写真の色彩情報を CG の葉へ移すことによりシェーディングする.

CS 法では、任意の画像(スティーリング画像と呼ぶ)と関連付けられた二つの IFS を用いる。一方の IFS は Stealing IFS (SIFS) と呼ばれ、スティーリング画像と関連付けられる。もう一方の IFS を Drawing IFS (DIFS) と呼ばれ、作成される CG 画像と関連付けられる。両 IFS はフラクタル頂上関数 $\tau(x)$ により、それぞれ記号空間 Σ へ写像され、同じ番地上にスティーリング画像から CG へ同じ色が対応づけられ、シェーディングが施される。図 7 に示されるように、実際の紅葉写真を色彩情報元となるスティーリング画像とみなし、色を取得する葉の部分に覆う写像を持つ SIFS (図 7 中段右図)を設定する。次に、描画したい葉形状を表す DIFS (図 7 中段左図)の写像を設定する。図 7 中段図では四角形枠を IFS の各写像として表し、本論文では写像数 4 の IFS を手動で設定した。この CS 法を用いた葉のシェーディング例を図 8 に示す。本論文では、葉の写真から葉の CG へ色を移した。樹木の写真から葉の CG へ色を移すこともできるが、この場合は写真の樹木部分を覆う SIFS を設定する必要がある。

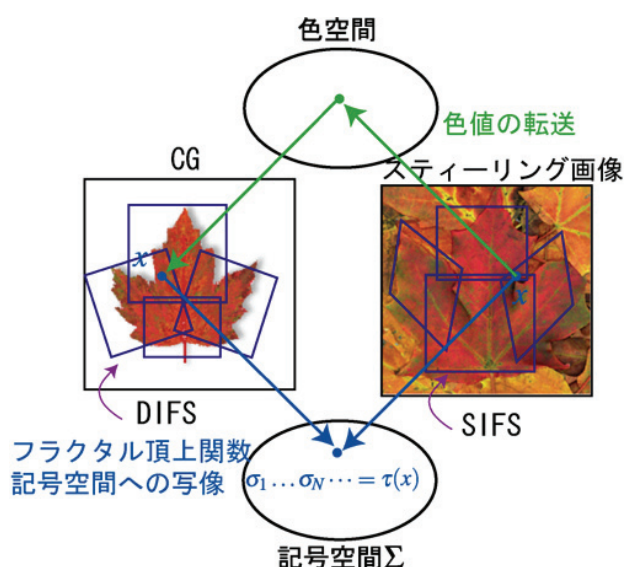


図 7 実際の紅葉写真から CG の紅葉へ色を移す CS 法の概念図



図 8 CS 法を用いた紅葉する葉の CG

3.4 全体紅葉

3.2 節では、樹木中の葉々の位置を記号空間へ頂上関数 $\tau(x)$ により 1 対 1 写像し、記号空間上でシフト演算子を用いることにより樹木を時系列紅葉変化させる手法を提案した。3.3 節では、フラクタル頂上関数 $\tau(x)$ を用い、葉の空間形状を記号空間へ 1 対 1 写像し、CS 法によるシェーディングを提案した。

枝・樹木、葉の両段階 IFS を再帰的・階層的に組み合わせることで、樹木全体の紅葉発色シェーディングを行う。本研究では、樹木 IFS, 葉 IFS を再帰的に用いる再帰的反复関数系 (Recurrent Iterated Function System: RIFS) を構築し、頂上関数 $\tau(x)$ により一つの記号空間 Σ へ 1 対 1 写像し、 Σ 上でその番地に対応付けられる色値を決定する。RIFS は状態遷移グラフを用いて説明されることが多く、例として、表 1 で示される RIFS $\{X; w_1, \dots, w_N, p_{ij}\}, i, j \in N = 3$ は図 9 のグラフのように示される。

w_i	p_{i1}	p_{i2}	p_{i3}
1	0.3	0.6	0.1
2	0.1	0.5	0.4
3	0.4	0.4	0.2

表 1 RIFS のパラメータ例

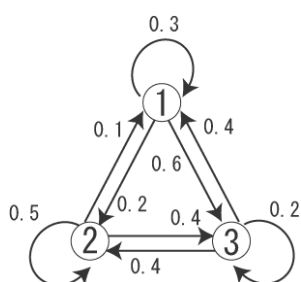


図9 表1のRIFS遷移グラフ

本研究では、図10に示される葉・樹木全体のRIFSを用い、頂上関数 $\tau(x)$ により、記号空間 Σ へ写像し、記号空間上で以下のようにシェーディング情報を決定する。記号空間上では、式(15)で表されるシフト演算子 S_i により、枝レベルからランダム反復アルゴリズムを開始し、葉レベルへとシフト遷移する事で、CS法により紅葉発色をシェードする。

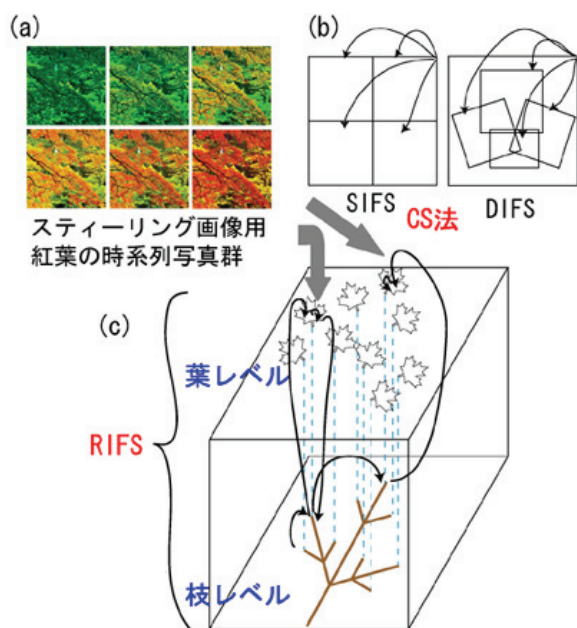


図10 紅葉のRIFS

本手法では、①CS法で用いるスティーリング画像として石倉ら[9]の紅葉段階分類を参考とした実際の紅葉写真(図10(a)参照)を用意する。スティーリング画像に適用するSIFSはタイルと呼ばれる四角形の画像を等分割する縮小写像を用

意し、DIFSに葉形状を表す縮小写像を用意する(図10(b)参照)。②式(12)で表される樹木L-systemを変換した式(13)のIFSに関連付けられた式(15)で表されるシフト操作 S_i により、樹木中の各葉の頂上記号番地へ移動し、紅葉発色段階をFS手法Iにより決定する。③シフト操作 S_i で、葉中の記号番地へシフト写像した場合、②で決定された紅葉段階に対応する①の紅葉写真を用い、その葉をCS法によりシェーディングする。④②、③を繰り返す。ここで、②においては、累積日射量マスク補正を用いても良い。この手法を用いてレンダリングした紅葉のCG画像を図11に示す。比較として図12に実際の紅葉写真を示した。また、植物色素の配合比変化[8][9]から葉の色彩値を決定し、全ての葉を一様に色彩変化させる手法による紅葉のCG画像を図13に示す。図11ではRIFSの反復ステップ数から紅葉進度段階を求めた。図12では24節気の暦に紅葉進度段階を近似的に割り当てた。実際の紅葉では、同じ暦でもその年の気候などによって紅葉の進み方は異なり、紅葉段階と紅葉の色彩を一意に決定することは困難である。図11と図12の紅葉段階表記は近似的に決めているため、本提案手法による紅葉CGと実際の紅葉写真の紅葉進行段階にはずれが存在する。また、RIFSの反復ステップ数と樹木の紅葉進度値の対応を一定に定めた場合でも、RIFSの確率パラメータによって樹木中の紅葉の偏りが異なる場合がある。本論文では、なるべく図12に近いRIFS確率パラメータを調整設定し、図11を作成した。図11と12では葉の数、樹木の規模が大きく異なるので、単純な比較は困難である。また、実際の紅葉の写真では、紅葉段階6で落葉が始まっているので、この段階での比較は困難である。図11, 12の見た目の比較から、我々の手法では紅葉の時空間複雑性が一定程度保持されていることがわかる。ただし、図12では順次落

葉が見られるが本論文では色彩変化のみに限定しているため図 11 では落葉が起きてはいない。

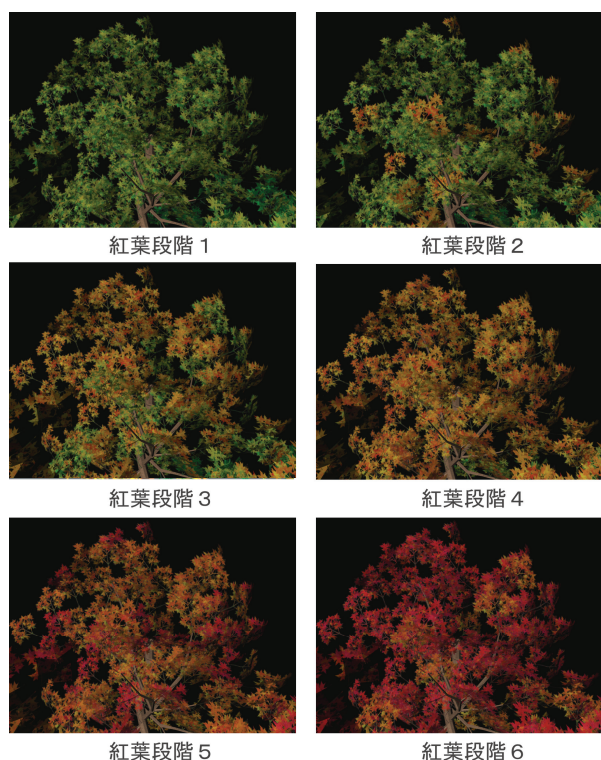


図 11 本手法によって生成された紅葉 CG



図 12 定点観測された実際の紅葉写真

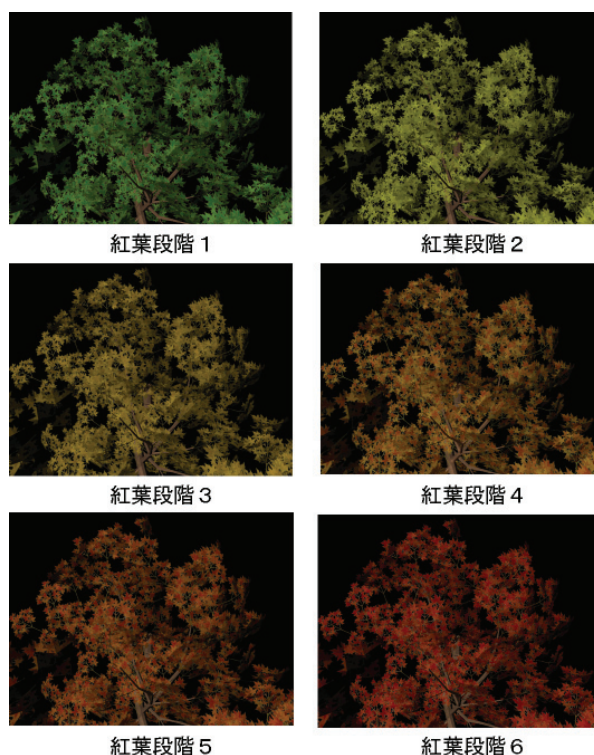


図 13 一様色彩変化手法による紅葉の CG

4. 実際の紅葉との比較

紅葉は、樹木、葉と複雑な三次元構造中、複雑な要因に支配されながら化学反応により発色して行く。そのため、現実的な「紅葉らしさ」を評価することは困難である。本論文では、色彩の複雑度を計る尺度としてエントロピーを用い、作成された CG 画像と実際の紅葉写真のエントロピーを計測し、比較する。エントロピーの比較により、頂上関数により写像された色彩情報が、その複雑性を「位相同型」[5]により保持していることを確認する。

実際の紅葉樹木は、三次元空間構造を持つ。三次元樹木上の全ての葉一枚一枚の色値を読み取りデータ化することは困難なため、写真として定点観測された紅葉樹木の二次元画像からエントロピー計算を行う。ここでは、写真集[12]において、初秋から晩秋までの異なる紅葉段階の 6 枚の写真(図 12)のエントロピーを計り、作成された

CGに対しても、図11においてレンダリングされた二次元画像からエントロピー計算を行い、比較を行った。エントロピー算出方法として、画像の背景および枝部分を除いた葉部分の全ピクセル数を N として、 k 平均法を用いたベクトル量子化減色法[13]を用いて量子化する。量子化したのちの画像の色値 i のピクセル頻度 N_i の確率は $P_i = N_i / N$ となる。紅葉色を各128色に減色量子化する。各紅葉のシャノンのエントロピーを求め、シャノンのエントロピーは以下のように定義される。

$$H = -\sum P_i \log P_i \quad (16)$$

樹木上の葉々が全て緑色である紅葉の初期段階から、晩秋の最終段階までのエントロピーの推移グラフを図14に示す。初秋および晩秋では、樹木中の大半が緑色あるいは、赤褐色で占めるため、エントロピーは低い。一方、紅葉中盤においてエントロピーが最大となる。本提案手法において作成されたCG画像においても同様の推移が図14に見られる。また、一様変化によるCGでは、時系列においてエントロピー値は一定であった。図14において、生成されたCG画像のエントロピーが実際の紅葉写真のエントロピーより低いのは、樹木の葉の数が大幅に少ないことが原因だと考えられる。これは、生成するCG画像における樹木の葉の数を増やすことによって、実際のものに近づけることができると考えられる。しかし、計算時間が大きくなるのでここではその比較は割愛する。

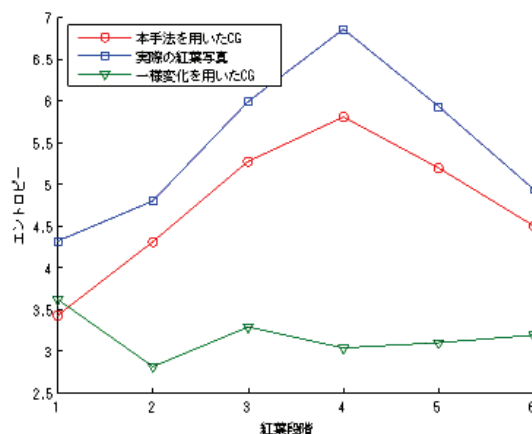


図14 図11と図12, 図13に対するエントロピー比較

次に、樹木構造に付随する色彩変化の複雑性を比較するために、図11と図12, 図13のフラクタル次元[16]を時系列において比較を行う。本論文で取り上げたカエデ科の紅葉は、主に緑色から黄色、赤色へと色彩変化する。そこで、図11と図12, 図13の背景部分を除去した後に、緑色、黄色、赤色でそれぞれ分色を行った画像を二値画像化し、ボックスカウント法[16]を用いてフラクタル次元を算出した。図11と図12, 図13に対して緑色、黄色、赤色部分のフラクタル次元の推移をそれぞれ図15, 図16, 図17に示す。

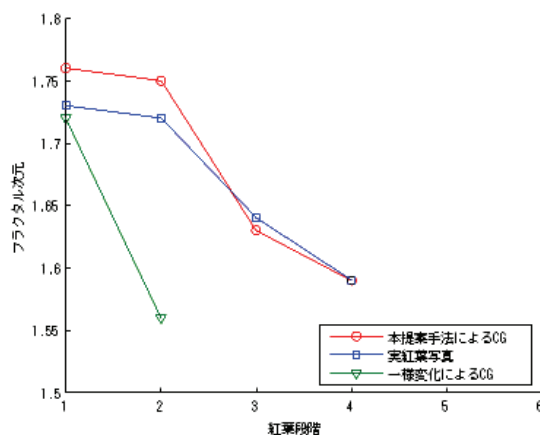


図15 図11と図12, 図13における緑色部分のフラクタル次元

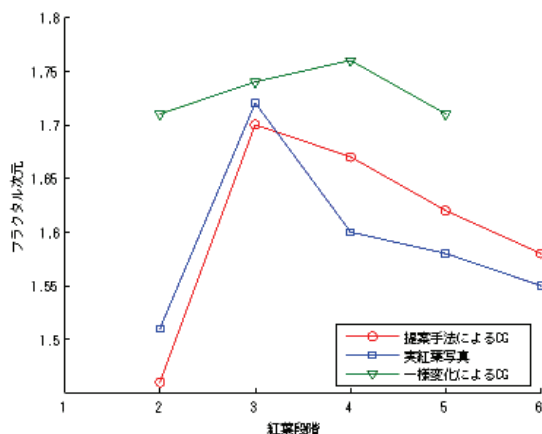


図 16 図 11 と図 12, 図 13 における黄色部分のフラクタル次元

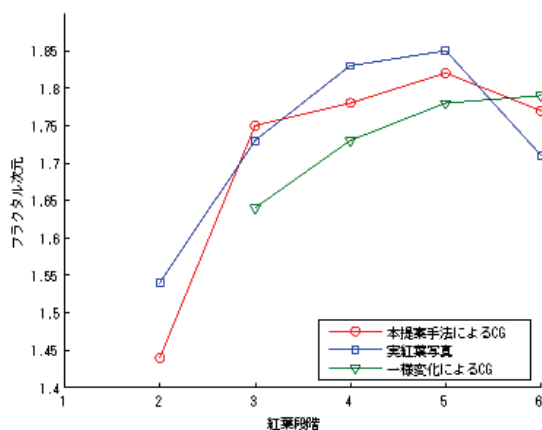


図 17 図 11 と図 12, 図 13 における赤色部分のフラクタル次元

図 15 において、紅葉の初期段階では緑色部分が最も多く、樹木構造に従い分布するためフラクタル次元が時系列で最大になり、のちに緑色部分が消失するためフラクタル次元が徐々に減少する様子が本提案手法による CG と実際の紅葉写真において見られることを示し、一様変化による CG は第 2 段階以降急激にフラクタル次元が減少することを示している。図 16 において、紅葉の中期段階において黄色部分が最も多く、フラクタル次元が時系列で最大になり、フラクタル次元が上に凸

で推移する様子が本提案手法による CG と実際の紅葉写真において見られることを示し、一様変化による CG では横ばいの推移が見られることを示している。図 17 においては、紅葉後期の第 4 から第 5 段階において赤色部分のフラクタル次元が本提案手法による CG と実際の紅葉写真において増大することが見られることを示している。図 15, 16, 17 それぞれにおいて、色彩のフラクタル次元の推移が本提案手法による CG と実際の紅葉写真において近いことが示された。以上の比較から、元画像と、フラクタル頂上関数 $\tau(x)$ により、写像された記号空間に対応する色彩情報を CS 法に「フラクタル同型」に写像した CG 画像は、基本的にその複雑性を保持していることが推測される。しかし、詳細な比較は今後の研究が待たれる。

5. まとめ

本研究では、紅葉の空間・経時発色の複雑性を頂上関数 $\tau(x)$ により記号空間 Σ へ 1 対 1 写像し、記号空間上でのシフト演算子を用いた経時発色シェーディング (手法 I)、記号空間上で頂上番地間の色彩情報の写像によるシェーディング (手法 II) により再現することを提案した。空間および時間における複雑性を考慮し、L-system から変換した IFS を枝・樹木 IFS, 葉を表す IFS を葉 IFS とし、再帰的に RIFS を構築し、頂上関数 $\tau(x)$ により統一的記号空間 Σ へ写像した。

落葉広葉樹において、葉中に含まれる化学反応から紅葉色が発色されるが、その植物生理学的発色は未解明の部分が多く、単純な色素の配合比から求めることは困難である。加えて、葉脈構造などの複雑な幾何学構造も紅葉に大きく関係する。紅葉する葉の時間・空間における複雑性を保つためには、CS 法で適切な IFS パラメータを用意する必要がある。この IFS パラメータの自動取得手続きは、いくつか手法があるが[14][15]、現段階

では精度および実行速度に対して問題が多い。本研究では、既知の単純な IFS パラメータを用い、紅葉の時系列発色をフラクタルシェーディング (FS)により CG レンダリングした。さらにシャノンのエントロピーによる色彩情報の複雑性が再構成されているかどうか実際の紅葉写真と CG 紅葉画像を比較した。また、フラクタル次元を計測することにより、空間および時間における紅葉の複雑性が再現されているかを比較した。最適な IFS を求め、より高度な色彩複雑性をシェーディングする FS 法は今後の課題となる。また、生成画像評価においてエントロピー以外の評価法も今後の課題である。本論文では提案手法の適応例としてカエデ科樹木の紅葉を取り上げたが、カエデ科以外の樹種に適応することも可能である。この場合、目的とする樹種の枝形状と葉形状を表す IFS を取得し、その樹種の実際の紅葉写真をスティーリング画像として用意する必要がある。また、同じ樹種でも気候により葉の発色が微妙に変わることがあるが、各発色を持つスティーリング画像を用意することである程度対応可能である。異なる樹種あるいは個体差をもたせた森林レベルの紅葉 CG への応用は今後の課題である。

参考文献

- [1] N. Chiba, K. Ohshida, K. Muraoka, and N. Saito. Visual simulation of leaf arrangement and autumn colours. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, Vol. 7, pp. 79–93, 1996.
- [2] 早乙女良江, 藤代一成, 池辺八洲彦. Biologically based modeling に基づく紅葉の再現-樹木個体レベルにおける色変化-. 情報処理学会研究会報告 93-CG-65, pp. 45–52, 1993.
- [3] 村岡一信, 千葉則茂, 高橋匡, 斎藤伸自. 季節変化に基づく山岳景観画像生成法の検討. 画像電子学会, Vol. 22, No. 5, pp. 466–474, 1993.
- [4] S. Mochizuki, D. Cai, T. Komori, H. Kimura, and R. Hori. Virtual autumn coloring system based on biological and fractal model. *Pacific Graphics '01 Computer Graphics and Applications*, pp. 348–354, 2001.
- [5] M. F. Barnsley, "Superfractals", Cambridge University Press, 2006.
- [6] 大谷俊二. 紅葉の化学. *化学と生物*, Vol. 23, No. 11, pp. 701–708, 1985.
- [7] 武田幸作. 紅葉のしくみ. *植物と自然*, Vol. 17, No. 11, pp. 2–6, 1983.
- [8] 石倉成行, 紅葉の生理科学, *植物と自然*, Vol. 13, pp. 32–35, 1979
- [9] Nariyuki Ishikura. Seasonal change in contents of phenolic compounds and sugar in rhus, euonymus and acer leaves with special reference to anthocyanin formation in autumn. *The Botanical Magazine, Tokyo*, No. 89, pp. 251–257, 1976.
- [10] M. F. Barnsley, *Fractals Everywhere*, Morgan Kaufmann, 2000.
- [11] Przemyslaw Prusinkiewicz and Aristid Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag, 1990.
- [12] 佐々木博之, かえで, 河出書房新社, 2000
- [13] A. Gersho, and R. M. Gray, *Vector Quantization and Signal Compression*, Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [14] Y. Fisher, *Fractal image compression: theory and application*, Springer-Verlag London, UK, 1995.
- [15] 我孫子俊瑞. 多項式処理を用いたフラクタル画像の反復関数システム符号化アルゴリズムに関する研究. 東北大学博士論文, 2001.
- [16] 松下貢. フラクタルの物理, 裳華房, 2002