

2010年度 卒業論文

遮蔽物を考慮した  
紅葉のビジュアルシミュレーションに関する研究

指導教員：渡辺 大地 講師

メディア学部 ゲームサイエンスプロジェクト  
学籍番号 M010235  
佐藤 世幸

2010年度 卒業論文概要

論文題目

遮蔽物を考慮した  
紅葉のビジュアルシミュレーションに関する研究

メディア学部

学籍番号：M010235

氏名

佐藤 世幸

指導  
教員

渡辺 大地 講師

キーワード

紅葉、遮蔽物、ビジュアルシミュレーション、  
自然景観、コンピュータグラフィックス

近年、コンピュータグラフィックスやゲームにおける自然景観のシミュレーションは盛んに行われている。自然景観とは、山・川・空など日常生活で自然と呼ぶ景色のことである。自然景観のシミュレーションは、コンピュータの性能の向上や、技術の進展に伴いリアルな表現が可能となった。中でも樹木の表現は、多種多様に渡ってシミュレーションや研究が行われてきた。特に日本は季節がはっきりしているため、秋特有の現象である紅葉を表現するビジュアルシミュレーションも盛んである。

実際の紅葉した葉は、様々な色の模様が出来、中にはグラデーションになっている部分もある。しかし、既存研究では、葉ごとに事前に用意した何種類の画像を割り当てているため、紅葉した葉上の色の模様が5~7つと限られていると分かる。また、模様ごとの境目がはっきりと区別されていて、不自然に感じてしまい、リアルに表現しているとは言えない。そのため、葉に近づいた時や拡大した時にリアルに見えない。

そこで本研究では、葉ごとの個性を出すような紅葉表現のビジュアルシミュレーションを目的とした。紅葉現象で発現する色は、太陽からの光が葉上に当たり、紅葉現象特有のエイジングという現象を引き起こすことによって表現できる。本手法では、葉の形は実写真を元にテクスチャとして用意し、葉上の色は、葉を構成するピクセルごとに色を割り当てる。各ピクセルに割り当てる色は、既存研究から得たデータを元に3次式の関数を作り、各ピクセルの配色を決定する。関数を利用するために3つの値を必要とする。第1の値は、葉上の各ピクセルには紅葉の色変化の現象から求めた、ピクセルの場所による遅延度である。第2の値は、葉上の各ピクセルごとに、遮蔽物に遮られなかった太陽からの日光が当たった量(以下日射量)である。第3の値は、各ピクセルの重みと、日射量により求めた紅葉進度である。紅葉進度を配色の関数に代入することによって、各ピクセルの配色を決定した。その結果、遮蔽物で作られた影を考慮し、葉ごとに個性が出るリアルな紅葉する葉を表現した。

# 目次

<b>第1章</b>	<b>はじめに</b>	<b>1</b>
1.1	研究背景と目的	1
1.2	論文構成	3
<b>第2章</b>	<b>紅葉</b>	<b>4</b>
2.1	紅葉とは	4
2.2	紅葉の仕組み	5
2.3	エイジング	6
2.4	遮蔽物の影響	7
<b>第3章</b>	<b>提案手法</b>	<b>9</b>
3.1	色遷移	9
3.2	エイジングによる紅葉の遅延度設定	11
3.2.1	葉部分の遅延度設定	12
3.2.2	葉脈部分の遅延度設定	15
3.3	遮蔽物の影響を受けた日射量の算出	15
3.4	各ピクセルの色決定	17
<b>第4章</b>	<b>実装結果</b>	<b>19</b>
4.1	環境	19
4.2	実装結果	19
<b>第5章</b>	<b>まとめ</b>	<b>28</b>
	<b>謝辞</b>	<b>29</b>
	<b>参考文献</b>	<b>30</b>

# 目次

1.1	様々な色模様を持つ葉 (1)	2
1.2	様々な色模様を持つ葉 (2)	2
2.1	イロハモミジ	5
2.2	葉のエイジング	7
2.3	イロハモミジの樹木の様子	8
3.1	計測した各 RGB 値のグラフ	10
3.2	各 RGB 値の近似式	11
3.3	距離算出の例	13
3.4	輪郭部からのエイジングのみを考慮した紅葉	13
3.5	先端部からのエイジングのみを考慮した紅葉	14
4.1	紅葉進度 0%	20
4.2	紅葉進度 10%	20
4.3	紅葉進度 20%	20
4.4	紅葉進度 30%	20
4.5	紅葉進度 40%	20
4.6	紅葉進度 50%	20
4.7	紅葉進度 60%	21
4.8	紅葉進度 70%	21
4.9	紅葉進度 80%	21
4.10	紅葉進度 90%	21
4.11	紅葉進度 100%	21
4.12	実際の紅葉した葉 (1)	22
4.13	実際の紅葉した葉 (2)	22
4.14	遮蔽物の影響を受け紅葉した葉	23
4.15	シミュレーション結果 (1)	24
4.16	シミュレーション結果 (2)	24
4.17	実験環境 2 のイメージ図	25
4.18	遮蔽物の影響を受け紅葉した葉	26

# 第 1 章

## はじめに

### 1.1 研究背景と目的

近年、コンピュータグラフィックスやゲームにおける自然景観のシミュレーションは盛んに行われている。自然景観とは、山・川・空など日常生活で自然と呼ぶ景色のことである。自然景観のシミュレーションは、コンピュータの性能の向上や、技術の進展に伴いリアルな表現が可能となった。中でも樹木の表現は、季節からの影響を受けやすいなどの特徴から、多種多様に渡ってシミュレーションや研究が行われてきた。

樹木を表現する研究には、太陽の存在を考慮している研究が多い。なぜなら樹木は、太陽からの影響を受けて生存しているためである。例えば、金丸ら [1] や丸山ら [2] による樹木のモデリングや、山下ら [3] による群生シミュレーションでは、樹木の成長の過程で日光を受けた場合、どのように木・枝が生えてくるかを表現した。また、秋になると緑色だった葉が赤や黄色に変化する紅葉現象は太陽の影響を大幅に受けるため、紅葉を表現するビジュアルシミュレーションも盛んである。石倉 [4][5]、大谷 [6]、北原 [7]、武田 [8] などの紅葉した葉の中の成分の解析を行う研究や、加藤 [9] による単純に紅葉らしさを見せる画像の生成の研究や、阪本ら [10]、村岡ら [11]、大場 [12] による紅葉の見え目などを観察データをとりコンピュータ上でシミュレーションする研究もある。また、早乙女ら [13][14] は生物学的観点から紅葉の進み具合をモデル化し、葉の存在位置の違いによる色変化の差を表現した。

望月ら [15][16] は、紅葉の進み具合にフラクタルの概念が適しているとし、色変化のコントロールを可能にし表現した。

既存研究での結果をみると、樹木全体から見る紅葉は、紅葉した葉が無数に集まっていて自然な紅葉に見える。しかし、早乙女らの結果では、樹木全体では自然に紅葉しているように見えるが、葉一枚に注目してみると、葉一枚に一色しか割り当てられていないため、不自然に感じる。また、望月らの結果では、樹木全体では自然に紅葉しているように見えるが、葉ごとに元ある画像を割り当てているため、紅葉した葉上の色の模様が5~7つと限られていると分かる。また、模様ごとの境目がはっきりと区別されていて、不自然に感じてしまい、リアルに表現しているとは言えない。実際の現実の紅葉した葉は、様々な色の模様が出来、中にはグラデーションになっている部分もある。図 1.1 と図 1.2 はその様子を示している。しかし、上記の研究では、樹木全体の紅葉を自然に表現するのに重点を置き、葉ごとの個性を見ていないため、葉に近づいた時や拡大した時にリアルに見えない。



図 1.1: 様々な色模様を持つ葉 (1)



図 1.2: 様々な色模様を持つ葉 (2)

そこで本研究では、葉ごとに様々な個性のある色模様を出すような紅葉表現の

ビジュアルシミュレーションを目的とする。本手法では、葉の形は実写真を元にテクスチャとして用意し、葉上の色は、葉を構成するピクセルごとに色を割り当てる。ピクセルの数が多いほど細かい表現が出来るため、様々な色模様を生み出せる。紅葉現象で発現する色は、太陽からの光が葉上に当たり、紅葉現象特有のエイジングという現象を引き起こすことによって表現した。また、太陽からの光を遮る遮蔽物によって色模様が変わるため、その存在を考慮した。各ピクセルに割り当てる色は、既存研究から得たデータを元に最小二乗法で求めた3次式の関数により、各ピクセルの配色を決定する。関数を利用するために3つの値を必要とする。1つ目は、葉上の各ピクセルには紅葉の色変化の現象であるエイジングより求めた、ピクセルの場所による遅延度である。2つ目は、葉上の各ピクセルごとに、遮蔽物に遮られなかった太陽からの日光が当たった量(以下日射量)である。3つ目は、各ピクセルの重みと、日射量により求めた紅葉進度である。紅葉進度を配色の関数に代入することによって、各ピクセルの配色を決定した。その結果、遮蔽物で作られた影を考慮し、葉ごとに個性が出て実際の紅葉のような色模様を再現したりリアルな紅葉する葉を表現した。

## 1.2 論文構成

本論文は全5章で構成する。2章では紅葉の仕組みと特徴について述べる。3章は本手法を述べる。4章は実装結果と検証を述べ、5章では本研究のまとめと今後の展望を述べる。

## 第 2 章

# 紅葉

紅葉する葉の色変化は、様々な要因から起きる現象である。本研究ではその要因によってビジュアルシミュレーションを行うため、本章で紅葉の仕組みや特徴について述べる。

### 2.1 紅葉とは

紅葉とは、秋から冬にかけて、樹木の葉の色が緑色から黄色・赤色へ徐々に変化していく自然現象、またはそのように色づいた葉のことをいう。この自然現象は、熱帯から温帯さらに寒帯に至るまでの広い地域で、多くの植物の幼年期や落葉期に見られる。しかし、本来の紅葉の意味では、秋の草本や晩春から初夏に常緑樹の幼葉に見られる紅葉などは除き、秋の落葉樹の葉の紅葉を指すのが普通である [6]。紅葉する樹種は主に落葉広葉樹で、多くの樹種があり、樹種によって紅葉の色が違っている。例えば、いちようは秋になると葉の色が緑色から黄色に変化するが、これも紅葉と言う。

一般的に認知されている紅葉は、落葉広葉樹のカエデ科であり、この種類を主にもみじと呼んでいる。もみじを指す場合、葉の切れ込みによって主に5~7股に分かれた葉を指す場合が多い。これは「イロハカエデ」と呼ぶ樹種で、紅葉前線と呼ぶ紅葉の見頃の時期の基準として設定する樹木である。図 2.1 は1枚のイロハモミジである。



図 2.1: イロハモミジ

## 2.2 紅葉の仕組み

紅葉する葉は、夏の間は緑色である。その時に葉に含まれている色素は、緑色の色素クロロフィルと、黄色の色素カロチノイドである [4][6][7][17]。この二つは葉緑体の中に含まれていて、クロロフィルとカロチノイドの量の比が 5:1~8:1 とクロロフィルの方が多いため、夏の間は緑色に見える。

秋になるにつれて、寒くなり日照時間が短くなると、葉緑体が崩壊を始める。葉緑体が守っていた 2 つの色素は、光や酸素に弱いため分解・酸化を始める。この時、クロロフィルもカロチノイドも分解・酸化するが、カロチノイドがクロロフィルよりも分解してしまう速度が遅いため、次第に葉中におけるカロチノイドの割合が勝るようになる。つまり、葉上の色は、緑色から黄色に変化していくように見える。

また、葉緑体の崩壊と同じ頃に、葉は離層と呼ぶコルク質の層を葉と枝の間に形成する。離層は葉と枝の栄養交換を遮る役目を持っていて、葉緑体で行った光

合成によって出来た糖が葉から枝に流出するのを妨げる。糖は行き場を失い、葉中に糖が貯まる。この糖に日光が当たると赤色の色素アントシアニンに化学変化し、葉上で赤色が発色するようになる。アントシアニンができるのは、クロロフィルの分解・酸化が終わり、カロチノイドが目立ち始めてからの場合が多い。そのため、葉上の色変化は緑色→黄色→赤色、と変化する葉が多くなる。

この現象は、葉一枚の全体で同時に発生するのではなく、細胞毎に発生している現象である。そのため、葉に複雑な色模様が現れる。

## 2.3 エイジング

紅葉の特徴の一つとして、エイジングという葉の時系列発色現象がある [15]。エイジングとは、生物学で「加齢」と呼ばれ、主要な太い葉脈から最も離れた位置にある輪郭部、先端部から紅葉が始まり、時間が経つにつれ、葉の内側に紅葉が進んでいく。これは、外側にいくほど、蓄積される糖の量は多くなるため、蓄積糖が日光によって赤色の色素アントシアニンに変化する為、外側から段々色が変わっていきように見える。ここで、主要な太い葉脈とは、葉の付け根部分から葉の先に伸びている葉脈である。イロハカエデの場合、葉の先が複数に分かれているため、太い葉脈は葉の分かれた数と同数になる。図 2.2 はエイジングの様子が見える葉である。



図 2.2: 葉のエイジング

## 2.4 遮蔽物の影響

エイジングに従って紅葉していくはずの葉の一部が赤く変化しない現象もよく見る。例えば、樹木の内側の葉より外側の葉の方が早く赤くなっている場合が多い。図 2.3 はその様子を表している。これは、樹木の内側の葉が外側の葉の影になって、日光が当たりにくくなったため起こる。クロロフィル・カロチノイドの分解と赤色の色素アントシアンの合成は日光によって行われるため、日光が当たらない部分は色が変わらなくなる。この現象は、日光を遮る遮蔽物があり、樹木の外側にある葉に影ができる場合にも起こる。遮蔽物の存在が、様々な色模様を生み出す原因となっていると考えられる。

遮蔽物になるものとして、次が挙げられる。樹木自身とその近くにある樹木の葉と枝、建物、地形である。遮蔽物となるものの大半は、樹木自身の葉と枝であることが多い。樹木からは生きるために無数の葉を作っている。それぞれの葉は、

光合成が出来るように葉と葉の合間から日光を受け取れるように生えようとするが、葉全体に日光が当たらない場合がある。なぜなら葉自身よりも外側にある葉が遮蔽物となってしまうためである。また、枝も同じように遮蔽物になる。樹木はその一本で生えるだけではなく、集団で生える場合もあるので、近くにある樹木の葉と枝も遮蔽物になる。樹木が生えている地点の周りには、樹木が生えているだけではなく、建物が建っている場合もあるので、建物も遮蔽物となる。また、山の斜面に木があり、山の反対方向から日光が降り注いでいた場合、山自体が遮蔽物となる。つまり、地形が遮蔽物になる時もある。

この3種類の遮蔽物によって、紅葉する葉の色模様は複雑になっていくのである。



図 2.3: イロハモミジの樹木の様子

# 第 3 章

## 提案手法

本章では提案手法を述べる。3.1 節では、葉上における色遷移のための関数を求める。3.2 節では、エイジングによる各ピクセルの紅葉の遅延度設定の方法を述べる。3.3 節では、日光の当て方や遮蔽物の影響によって、どのように各ピクセルの日射量を求めるかを述べる。3.4 節では、3.1 節～3.3 節で求めた色関数と各ピクセルに設定した遅延度と日射量から最終的な色決定を行う。また、葉は 600×600 ピクセルのテクスチャの画像で表現し、葉の形状は、図 2.1 の形状を用いる。

### 3.1 色遷移

色の付け方は、浜崎ら [18] のデータを使った。このデータでは、イロハモミジを 20 枚ほど用意する。それらを紅葉の進度によって肉眼で見た結果によって標本番号をつける。1 枚毎に RGB 値を出した結果のグラフが、図 3.1 となっている。図 3.1 は、計測したそれぞれの RGB 値である。

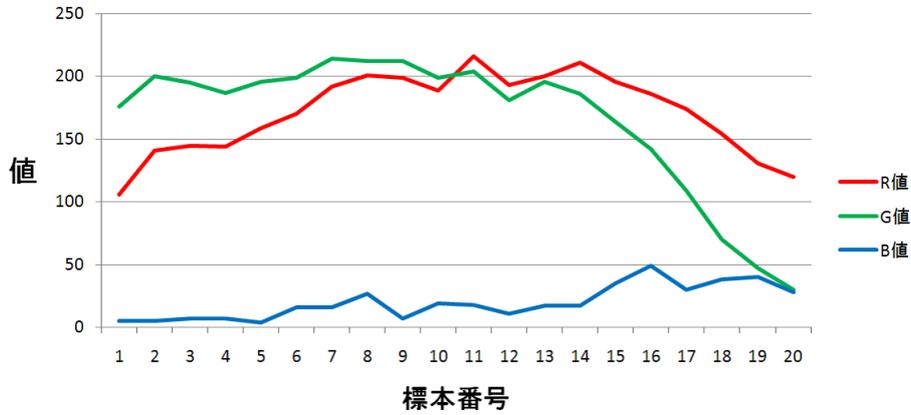


図 3.1: 計測した各 RGB 値のグラフ

本研究では、紅葉の進行度に応じて RGB をブレンドし色の連続性を出すために、図 3.1 の結果に近似曲線を当てはめて関数を得た。近似曲線は最小二乗法 [19] を使い、グラフに近い結果を得た 3 次式とした。最小二乗法とは、相関関係にあるデータを一つの関数で表そうとする方法である。次に関数をどのようにしたか示す。

まず、3 次式の一般式を式 (3.1) とする。

$$f(x) = a_1x^3 + a_2x^2 + a_3x + a_4 \quad (3.1)$$

最小二乗法の式は次のとおりである。ここで  $n = 20$ (要素数) とする。

$$\begin{pmatrix} a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 \\ \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^5 \\ \sum_{i=1}^n x_i^3 & \sum_{i=1}^n x_i^4 & \sum_{i=1}^n x_i^5 & \sum_{i=1}^n x_i^6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n (x_i y_i) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^2 y_i) \\ \sum_{i=1}^n (x_i^3 y_i) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

式(3.2)に、標本番号を  $x$  とし、 $y$  にそれぞれ、Rの値、Gの値、Bの値を当てはめ、 $a_1 \sim a_4$ の係数を求めた。それらを式(3.1)に代入し、3つの関数を求める。式(3.3)は、Rの割合の関数、式(3.4)は、Gの割合の関数、式(3.5)は、Bの割合の関数である。各係数は冗長なので、便宜的に小数点第6位を四捨五入している。図3.2はそれぞれの近似式のグラフである。

$$y = -0.02924x^3 - 0.06839x^2 + 13.82080x + 100.52054 \quad (0 \leq x \leq 20) \quad (3.3)$$

$$y = -0.05117x^3 + 0.44431x^2 + 3.47528x + 178.52921 \quad (0 \leq x \leq 20) \quad (3.4)$$

$$y = -0.00623x^3 + 0.22589x^2 - 0.48556x + 6.21383 \quad (0 \leq x \leq 20) \quad (3.5)$$

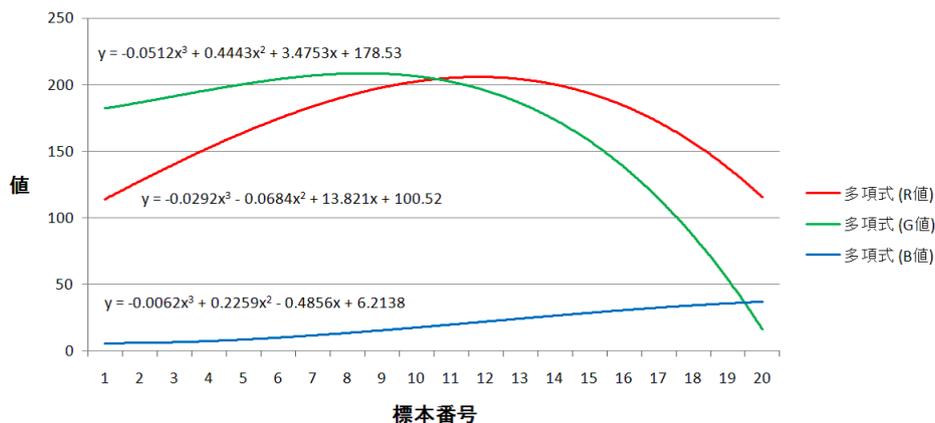


図 3.2: 各 RGB 値の近似式

## 3.2 エイジングによる紅葉の遅延度設定

次に、エイジングによる紅葉の遅延度の設定をしていく方法を述べる。遅延度設定は、各ピクセルごとに行う。紅葉の遅延度とは、紅葉の進みにくさを数値で表したもので、数値が0に近いほど紅葉が進みやすく、0から遠いほど紅葉が進みにくくなる。また遅延度を  $S$  とする。

遅延度設定の仕方は、それぞれのピクセルがテクスチャのどの部分を構成するピクセルかによって変わるため、元となるテクスチャの各ピクセルは、「葉部分」、「葉脈部分」、「背景部分」のいずれかの属性をもつものとする。

属性の決定方法として、葉部分は、葉脈部分と背景部分を持たないピクセルとする。葉脈部分は、事前にイロハモミジの画像を元に、葉脈に沿って手動で設定したピクセルとする。背景部分は、元画像の背景色に近い色を持つピクセルとする。背景部分は描画するピクセルではないので、遅延度設定は行わない。次に葉部分と葉脈部分の遅延度設定を述べる。

### 3.2.1 葉部分の遅延度設定

エイジングによる葉部分の遅延度設定の方法について述べる。エイジングとは、主要な太い葉脈から最も離れた位置にある輪郭部、先端部から紅葉が始まり、時間が経つにつれ、葉の内側に紅葉が進んでいく現象である。本手法では、輪郭部から始まるエイジングの遅延度を  $S_1$ 、先端部から始まるエイジングの遅延度を  $S_2$  とし、 $S_1$  と  $S_2$  から葉部分の遅延度  $S$  を設定する。

最初に、輪郭部から始まるエイジングについて述べる。葉の輪郭部から紅葉が始まるというのは、外側にあるピクセルから紅葉していくようにする。そこで、葉部分を持つ各ピクセルは、自身から最短距離にある背景部分を持つピクセルまでの距離を算出する。つまり輪郭部から始まるエイジングでは、距離が小さいほど遅延度も小さくなる。距離算出にあたって、葉部分を持つ任意のピクセル位置を基準点  $M_1$  とし、 $M_1$  を中心とする半径  $r_1$  の円を設定する。 $r_1$  は  $r_1 = 1$  を最小値とし、1ずつ増加する値である。設定した円の内部に背景部分を持つピクセルが1つ以上存在する場合、その時点での  $r_1$  の値を、最短距離として保持する。その後  $S_1 = r_1$  とする。同様の処理を葉部分を持つ全てのピクセルにおいて行う。図 3.3 は距離算出のイメージ図である。

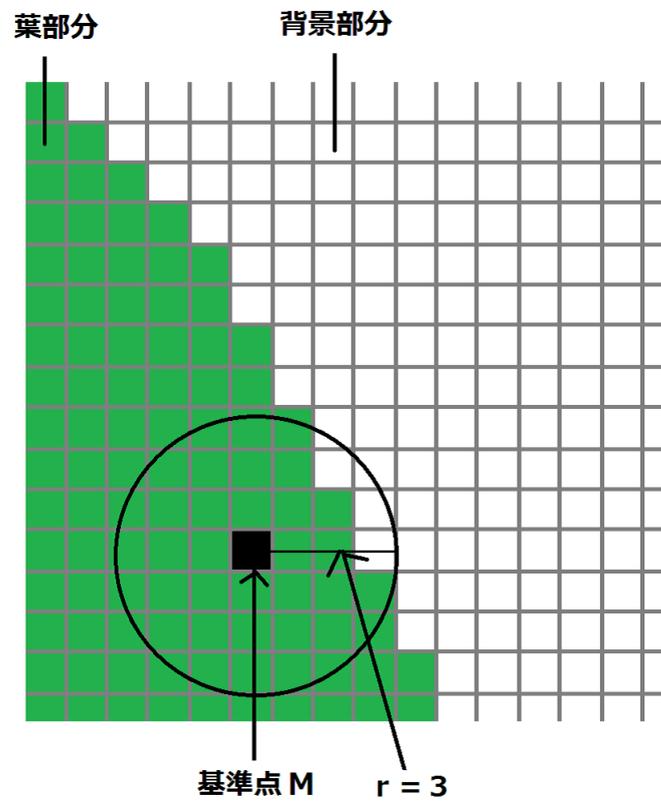


図 3.3: 距離算出の例

図 3.4 は輪郭部からのエイジングのみ考慮した紅葉の葉である。



図 3.4: 輪郭部からのエイジングのみを考慮した紅葉

次に、先端部から始まるエイジングについて述べる。葉の先端部というのは、7股に分かれたそれぞれの葉先である。本手法では、葉先になるほど紅葉するのが早いことから、葉脈の付け根から遠い場所ほど紅葉するのが早くなることとする。つまり、先端部から始まるエイジングでは、距離が大きいほど遅延度が小さくなる。距離算出の方法は、輪郭部の距離算出の方法と同様である。葉部分を持つ任意のピクセル位置を基準点  $M_2$  とし、 $M_2$  を中心とする半径  $r_2$  の円を設定する。 $r_2$  は  $r_2 = 1$  を最小値とし、1 ずつ増加する値である。設定した円の内部に葉柄の付け根が存在する場合、その時点での  $r_2$  の値を、距離として保持する。その後、 $A$  をテクスチャにおける  $r_2$  の最大値とし、 $S_2 = A - r_2$  とする。

図 3.5 は先端部からのエイジングのみ考慮した紅葉の葉である。



図 3.5: 先端部からのエイジングのみを考慮した紅葉

次に、輪郭部からのエイジングと先端部からのエイジングを同時に作用する方法を述べる。

$S_1$  と  $S_2$  は、二つの遅延度を合計し、これを各ピクセルのエイジングの遅延度とする。ここで、 $S_1$  の最大値と  $S_2$  の最大値は大きな差があるため、 $S_2$  に係数を掛け、 $S_1$  との最大値と近い値にする。係数は 4 と設定し、二つの遅延度の合計を  $S$  とし、式 (3.6) を得る。

$$S = S_1 + \frac{S_2}{4} \quad (3.6)$$

### 3.2.2 葉脈部分の遅延度設定

葉脈部分を持つピクセルの遅延度設定について述べる。葉脈部分というのは紅葉進度が遅い [4]。そのため、周りの葉部分のピクセルが赤くなったとしても、その葉脈部分がすぐ赤くなるわけではない。したがって、葉脈の周りが赤くなって大分経った後に紅葉し始めるという現象を設定する。

葉脈部分の重み設定は、葉部分の遅延度と同様に求めた後、さらに遅延度を 20 付加する。

### 3.3 遮蔽物の影響を受けた日射量の算出

本節では遮蔽物の影響を受けた日射量の算出を述べる。日射量というのは太陽の光が当たった総量とする。紅葉現象は、2.1 節で言及しているように太陽の日光の存在が必要である。

太陽より出た日光は樹木の葉に到達し紅葉するが、太陽の位置と葉の間に何らかの遮蔽物がある場合は、日光が到達しないため紅葉は進まない。本研究では、擬似的に葉の各ピクセルから太陽の位置に向けて日光が出ることにし、到達した日光が太陽に当たると日射量が増加し、紅葉が進むこととする。葉の各ピクセルから出た日光は、何かの遮蔽物に当たると日光が消え、そのピクセルの紅葉は進まない。

次に、太陽の位置と日光の向きを算出する。現実空間での太陽は季節によって運行経路が異なっているため、紅葉現象が起こる 10 月から 12 月の初旬、その間にも太陽の運行経路が変わり、遮蔽物を考慮した際の影の位置や大きさなどが異なる。そのため、シミュレーション内では、太陽の運行経路を導き出し太陽の位置を得て、その位置から日光の向きを設定し、紅葉現象を表現する。太陽の位置は、地球を擬似的にあらわした天球上にあるものとし、日光の向きは、太陽からの平行光源の光とし、太陽の位置に対して一定とする。本手法では、太陽から日光が出るのではなく、葉の各ピクセルから出るものと扱うため、日光の向きは太

陽に向かうベクトルとなる。

次に、太陽の位置  $\mathbf{P}$  と日光の向き  $\mathbf{N}$  を求める。太陽の位置  $\mathbf{P}$  と日光の向き  $\mathbf{N}$  は、中川 [20] の太陽方位、高度の計算の数式を使って求めた。計算に必要な値とを表 3.1、表 3.2、表 3.3 に示す。

表 3.1: 変数名

$D$	元旦からの通し日数 (任意設定)
$H$	時間 (日本標準時・任意設定)
$\phi$	緯度 (任意設定)
$\lambda$	経度 (任意設定)
$\delta$	当該日の太陽赤緯
$Eq$	均時差
$\eta$	太陽の時角
$\alpha$	太陽の方位
$\psi$	高度

表 3.2: データ

$a$	0.006918
$b$	0.399912
$c$	0.070257
$d$	0.006758
$e$	0.000907
$f$	0.002697
$g$	0.001480
$h$	0.000075
$i$	0.001868
$j$	0.032077
$k$	0.014615
$l$	0.040849

表 3.3: 太陽方位と高度を求める数式

$\theta_0 = 2\pi(D - 1)/365$
$\delta = a - b \cos(\theta_0) + c \sin(\theta_0) - d \cos(2\theta_0) + e \sin(2\theta_0) - f \cos(3\theta_0) + g \sin(3\theta_0)$
$Eq = h + i \cos(\theta_0) - j \sin(\theta_0) - k \cos(2\theta_0) - l \sin(2\theta_0)$
$\eta = (H - 12)/12 + (\lambda - 135.0) + Eq$
$\alpha = \arcsin(\sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\eta))$
$\psi = \arctan \left( \frac{\cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\eta)}{\sin(\phi) \sin(\alpha) - \sin(\delta)} \right)$

太陽方位  $\psi$  と高度  $\alpha$  から  $\mathbf{N}$  を求める。ここで求めた  $\psi$  と  $\alpha$  はラジアンなので、角度に変換する。その後、三角比を用いて、 $\mathbf{N}$  を求める。

$$\mathbf{N} \left( \cos \left( \frac{\psi\pi}{180} \right), \sin \left( \frac{\alpha\pi}{180} \right), \sin \left( \frac{\psi\pi}{180} \right) \right)$$

次に、葉の各ピクセルの日射量  $T$  を求める。日射量は、日光が当たった時間の総量である。日射量の値の範囲は下限を 0、上限を 100 とし、その範囲を超えたら下限または上限に近い方にする。また、日射量の増加量は全て 0.1 とする。太陽は、観測地点から 1 日中見えるわけではないので、高度  $\alpha$  をラジアンから角度に変換し、地表からの高度が正の時に日射量計算を行う。葉の各ピクセルから出た日光が太陽に到達すると、そのピクセルの日射量が増加し、日光が遮蔽物に当たり太陽に到達しなければ、そのピクセルの日射量は増加せず値は変化しない。つまり、日射量は葉の各ピクセルから出た日光が遮蔽物と当たり判定を判定することによって、各ピクセルの日射量が決まる。

遮蔽物には、葉、枝、建物、地形がある。枝、建物、地形と日光との当たり判定は直線と物体との交差判定によって求める。直線は基準となるピクセルから  $N$  方向に出た直線とする。葉と日光の当たり判定は、平面と直線の交点を求めることによって判定する。ここで、平面は当たり判定の対象となる葉のテクスチャとする。

葉との当たり判定の場合、当たり判定が成立したのならば、交点は、葉のテクスチャ上の一点に定める。遮蔽物の交点は遮蔽物のテクスチャ上にあるピクセルだが、用意した葉のテクスチャのピクセルには 3 つの属性があるため、属性によって結果が異なる。葉部分または葉脈部分の属性を持つピクセルは遮蔽物とみなすが、背景部分の属性を持つピクセルは遮蔽物とは言えない。そのため、平面上にある直線との交点が葉部分または葉脈部分の属性を持つピクセルだとしたら、基準となるピクセルの日射量は増加し、交点が背景部分の属性を持つピクセルだとしたら日射量は増加しないこととする。

### 3.4 各ピクセルの色決定

3.1 節～3.3 節で求めた関数と値を使って各ピクセルの最終的な色を決定する。色決定は、各ピクセルの遅延度と日射量を紅葉進度に変換し、色関数に入れて決定する。紅葉進度は、紅葉がどのくらい進んだかを表す値で 0～100% の範囲を持つ。

紅葉進度  $G$  を各ピクセルの遅延度  $S$  と日射量  $T$  から求める。  $S_{\max}$  は遅延度の最高値、  $G'$  は紅葉進度を範囲内に収める前の仮の値である。次の式 (3.7) は、シミュレーションで紅葉の様子を見て作成した。

$$G' = \frac{\frac{(S_{\max} - S)T}{S_{\max}} + T}{5} \quad (3.7)$$

式 (3.8) は求めた  $G'$  を範囲内に収める式である。

$$G = \min(20, \max(G', 0)) \quad (3.8)$$

出た値を式 (3.3)、式 (3.4)、式 (3.5) の  $x$  に入れピクセルの RGB 値が決まる。ただし、葉脈部分の属性を持つピクセルは RGB 値から同じ値を引き暗くすることによって、葉脈部分と分かるようにする。

# 第 4 章

## 実装結果

### 4.1 環境

本手法を検証するために使用した実験環境は表 3.1 通りである。

表 4.1: 実験環境

OS	Windows 7 Enterprise 64bit
CPU	AMD Phenom(tm) II X4 955 Processor 3.20 GHz
GPU	NVIDIA GeForce GTX 260
メモリ	4.00GB

### 4.2 実装結果

3章で述べた本手法を、3DグラフィックツールキットであるFK system[21]を用いて実装をした。

図 4.1～図 4.11 は一枚の葉全体に日光が平等に当たっているとし、一枚の葉全体が紅葉進度が 0 の時を 0%、一枚の葉全体が紅葉進度が 100 の時を 100%とし、10%区切りで結果を示した。



图 4.1: 紅葉進度 0%



图 4.2: 紅葉進度 10%



图 4.3: 紅葉進度 20%



图 4.4: 紅葉進度 30%



图 4.5: 紅葉進度 40%



图 4.6: 紅葉進度 50%



図 4.7: 紅葉進度 60%



図 4.8: 紅葉進度 70%



図 4.9: 紅葉進度 80%



図 4.10: 紅葉進度 90%



図 4.11: 紅葉進度 100%

3.2 節で述べたように、エイジングの現象によって葉の輪郭部と先端部から紅葉

が進んでいると分かる。また、葉脈部分のピクセルに重みを付加させることによって、葉脈部分の色の変化を葉部分より遅くすることが出来た。

次に、遮蔽物が影響した紅葉する葉である。図 4.12～図 4.14 の葉は実際の写真である。中央の葉が左側の葉の上空に位置することで、日光を遮っている様子が分かる。これを図 4.12 に示す。また、中央の葉が左側の葉に当たる日光を遮ったことにより紅葉する進行の度合いが変化した様子が分かる。これを図 4.13 に示す。また、図 4.14 は、左の葉が右の葉に覆いかぶさっていたために、右の葉の一部が最後まで赤くなっていない様子の写真を図 4.14 に記す。図 4.15 と図 4.16 は本手法で行ったシミュレーション結果で、実際の写真の状況を擬似的に想定して行った結果である。この時、実験環境は表 4.2 とする。



図 4.12: 実際の紅葉した葉 (1)



図 4.13: 実際の紅葉した葉 (2)



図 4.14: 遮蔽物の影響を受け紅葉した葉

表 4.2: 実験環境 1 の任意設定

緯度	北緯 35 度
経度	東経 135 度
始まりの日時	10 月 1 日 0 時 00 分
終わりの日時	12 月 11 日 0 時 00 分
時間の進む早さ	1 時間毎



図 4.15: シミュレーション結果 (1)



図 4.16: シミュレーション結果 (2)

実際の紅葉写真である図 4.12、図 4.13、図 4.14 と図 4.15、図 4.16 を見比べてみると、遮蔽物の存在によって葉に十分な日光が当たらず、紅葉する進行の度合いが遅いため赤く変色しきれず黄色のままとなっていて、実際の写真とシミュレーション結果に類似性が見られた。この結果、本研究によって遮蔽物で作られた影を考慮し、葉ごとに個性が出て実際の写真のような色模様を再現したりリアルな紅葉する葉を表現出来たと言える。ここで、実際の紅葉と比べ、図 4.15、図 4.16 の葉の黄色の範囲が広いのは、上の葉と下の葉に隙間が大きくあるため、遮蔽物の影響を大きく受けたためである。

次に、木の一部をシミュレートする。その様子のイメージ図を図 4.17 に示し、シミュレーション結果を図 4.18 に示す。右にある灰色の物体は建物である。この時、実験環境は表 4.3 とする。

表 4.3: 実験環境 2 の任意設定

緯度	北緯 35 度
経度	東経 135 度
始まりの日時	10 月 1 日 0 時 00 分
終わりの日時	12 月 1 日 0 時 00 分
時間の進む早さ	1 時間毎

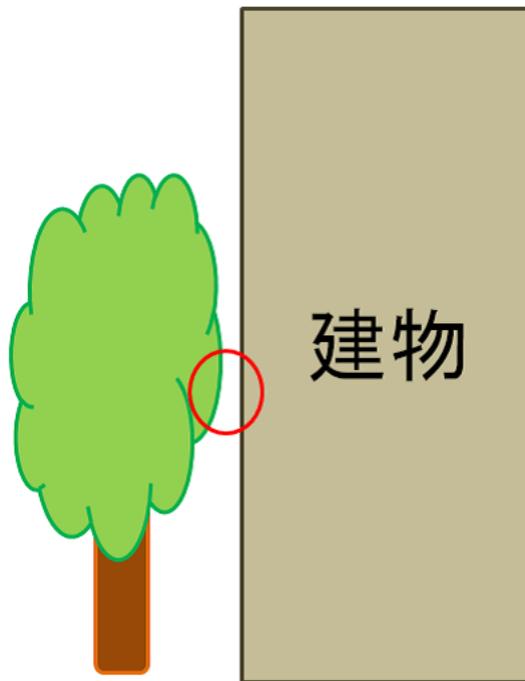


図 4.17: 実験環境 2 のイメージ図

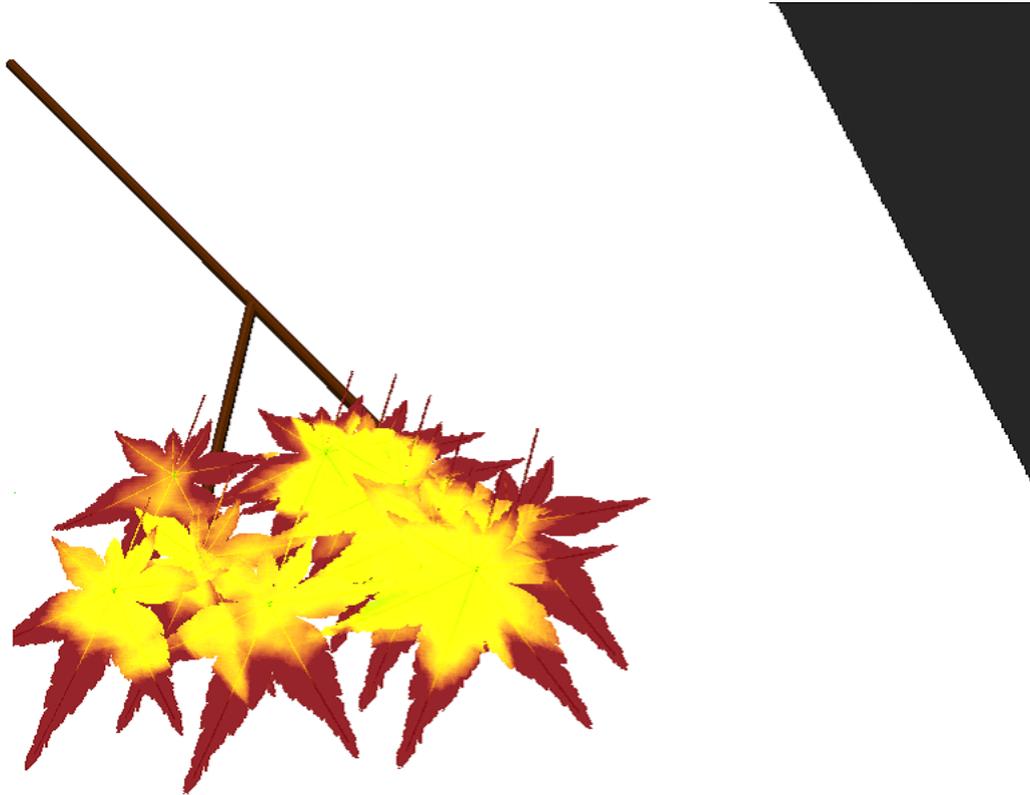


図 4.18: 遮蔽物の影響を受け紅葉した葉

シミュレーションした場所は、建物と近づいている木の一部分であり、図 4.17 の赤丸の部分となる。図 4.18 を見ると、遮蔽物によって影響を受け、最後まで色が変わっていない様子が分かり、葉ごとに個性のある色模様が出来た。しかし、遮蔽物である建物の影響をさほど受けていないように見える。これは、建物から葉が離れていたため影響を受けていないためと考えられる。

また、実行にかかる時間は、葉の枚数とユーザー入力した日数に大きく関わり、実験環境 1 では 40 分、実験環境 2 では 6 時間 30 分かかる。実行に時間がかかるのは、葉 1 枚につき 360000 個のピクセルを全て計算するため、また、日数が多くなるほどシミュレーションの数が増えるためである。

現状の実装では以下のような問題がある。図 4.18 の実装では、10 枚の葉と枝と

建物を元にシミュレーションしたが、葉の数がこれ以上多くなってしまうと、メモリがオーバーしてしまうという問題が発生した。それは、葉の画像テクスチャのサイズが600×600と大きいためである。サイズを小さくすることによって1本の木を表示できるが、テクスチャのピクセルの数が減ってしまうため、個性のある色模様が出にくくなる。そのため、シミュレーションするには、テクスチャのサイズと葉の数を換え、用途に合った設定をする必要がある。

## 第 5 章

### まとめ

本研究では、葉ごとの個性を出すような紅葉表現の生成手法として、各ピクセルごとに紅葉の色変化の現象であるエイジングより求めた重みと、太陽の運行経路からの日光と遮蔽物を考慮した日射量を求めた。その二つから紅葉進度を求め、新たに定義した配色の関数に代入することによって、色決定を行った。その結果、実際の紅葉している葉のように様々な模様を持ったリアルな葉を再現することが出来た。

実際の紅葉している葉の再現は可能になったが、いくつか課題は残っている。エイジングの設定がこの葉に依存しているため他の樹種では新たに設定する必要がある。また、葉が枯れて本手法で定義した関数では表現できない色があったり、落葉する場合があると遮蔽物がなくなり日光の当たり具合が変わっていき、また異なる結果になるため、色変化だけではない成長を含めたシミュレーションが必要になる。

# 謝辞

研究を進めるにあたり、丁寧なご指導や助言をしていただきました、渡辺大地先生、三上浩司先生、先輩方に感謝致します。また、弱音を吐き続けた私を見捨てないでくれた研究室のメンバーに感謝します。皆さんが居なければここまでやってこれなかったです。本当にありがとうございました。

## 参考文献

- [1] 金丸直義 千葉則茂 高橋清明 斎藤伸自, “向日性による樹木の自然な枝振りのCGシミュレーション,” **電子情報通信学会論文誌 J 75-D-II**, 76–85 (1992).
- [2] 丸山恭扇 中前栄八朗 秦学英 多田村克己, “簡易 3D 樹木モデルと天空光を考慮したレンダリング,” **グラフィクスと CAD 99(19)**, 55–60 (1999).
- [3] 山下彰一 日高東潮 高井昌彰 佐藤義治, “個体間の相互作用を考慮した樹群の形成シミュレーション,” **全国大会講演論文集 48(2)**, 390 (1994).
- [4] 石倉成行, “紅葉の生理化学,” **植物と自然 13(11)**, 32–35 (1979).
- [5] 石倉成行, “カエデ科植物の紅葉,” **植物と自然 7(10)**, 17–20 (1973).
- [6] 大谷俊二, “紅葉の化学,” **化学と生物 23**, 701–708 (1985).
- [7] 北原春男, “物質合成から見た紅葉,” **弘前大学教育学部教育研究紀要 25**, 35–42 (1997).
- [8] 武田幸作, “紅葉のしくみ,” **植物と自然 12(11)**, 2–6 (1983).
- [9] 加藤智也, “紅葉処理アルゴリズムの開発.” <http://www.nagoya-bunri.ac.jp/~hasegawa/LAB/WK2002/HOUKOKU/A2Tomoya.PDF>.
- [10] 阪本敦志 北村眞一, “四季における樹木景観の色彩シミュレーション,” **土木情報システム論文集 6**, 141–148 (1997).

- [11] 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** 22(5), 466–474 (1993).
- [12] 大場有希子, “山地帯天然林毎木データによる林内景観シミュレーションとその応用に関する研究.” <http://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/dspace/bitstream/2261/19960/1/K-00439-a.pdf>. 東京大学.
- [13] 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, 45–52 (1993).
- [14] 早乙女良江 藤代一成 池辺八洲彦, “生物学的モデルに基づく紅葉の可視化—木のレベルにおける色変化—,” **全国大会講演論文集** 46(2), 357–358 (1993).
- [15] 望月茂徳, “生物学・フラクタルモデルに基づいた紅葉のビジュアルシミュレーション,” **筑波大学大学院博士課程 システム情報工学研究科修士論文** (2002).
- [16] 望月茂徳 堀江大輔 蔡東生, “紅葉のフラクタルシェーディングに関する研究,” **芸術科学会論文誌** 62, 76 – 87 (2007).
- [17] 松井直之, “紅葉と黄葉の話.” <http://www.phyton-cide.org/series8.html>.
- [18] 浜崎敦史 長谷川真 坂東忠司, “RGB カラー分解を用いた紅葉の観察,” **フォーラム理科教育** (3) (2001).
- [19] 藤崎章男, “最小二乗法で近似式を求める.” <http://atsugi5761455.fc2web.com/calking16.html>. 名古屋文理大学.
- [20] 中川清隆, “太陽方位、高度、大気外日射量の計算.” [http://www.es.ris.ac.jp/~nakagawa/met\\_cal/solar.html](http://www.es.ris.ac.jp/~nakagawa/met_cal/solar.html). 立正大学地球環境科学部環境システム学科.

[21] 渡辺大地, “FineKernelToolKitSystem.” <http://www.teu.ac.jp/media/~earth/FK/>.