

反応拡散系におけるパラメータ探索の効率化

中森工慈 高井昌彰
北海道大学工学部 北海道大学大型計算機センター

テクスチャを自動的に合成するための一手法として、反応拡散系 (Reaction-Diffusion Systems) と呼ばれる局所的、非線形的な相互作用のモデルが注目されている。このモデルは生体学的な見地から提唱されたもので、パラメータを変化させることにより様々な興味深い模様を形成することが可能である。

しかし反応拡散系は、与えるべきパラメータの数が多く、かつその調整が非常に微妙であるという欠点をもつため、その設定をすべて手作業で行なうには困難が伴う。本稿では、反応拡散系のパラメータ空間を探索して様々なテクスチャを生成するアルゴリズムを提案する。あわせて本アルゴリズムの超並列計算機への実装を試みる。

Texture Exploration by Using Reaction-Diffusion Systems

Koji Nakamori and Yoshiaki Takai
Hokkaido University
Faculty of Engineering / Computing Center

A reaction-diffusion system, which is a process model of local nonlinear interactions in biological systems, provides us with a powerful tool to generate textures automatically. Numbers of interesting textures are produced by adjusting the parameters of the system. But it is not so easy for users to find the best parameters set for the desired textures without practical skills. Because the reaction-diffusion systems have many parameters to be tuned and are very sensitive to the conditions of those.

In this paper we present a heuristic algorithm to explore the textures generated by the reaction-diffusion systems, and implement it on a massively parallel computer. Our final goal is to develop a texture navigation system based on the reaction-diffusion model.

1 はじめに

CGにおいて3次元の形状を描き出す方法は数多く存在するが、現在最も多く用いられるのは多角形の組み合わせで3次元物体を表現するポリゴンレンダリングである。ポリゴンレンダリングにおいては、2次元、もしくは3次元のテクスチャをポリゴンに貼り付ける、いわゆるテクスチャマッピングは欠かすことのできない重要な技術である。

テクスチャマッピングに用いられるテクスチャは、主に人間の手によって製作されることが多い。しかし、動物の皮膚の模様や岩肌といった自然物のテクスチャを作成するのは、熟練者にとっても手間のかかる作業である。幾何学的なテクスチャを自動生成する手法は数多く提案されてきたが、その一方で自然物のテクスチャを自動生成する研究はあまり進んでいない。

自然物のテクスチャを生成するための手法の一つとして、“反応拡散系”と呼ばれる非線形の相互作用を用いたモデルが提案されている [3, 4]。このモデルを用いると、自然な風合いを持った複雑なテクスチャを生成することが可能である。しかし反応拡散系はその性質上、モデルに与えるべきパラメータの数が多く、さらにその設定が非常に微妙であるという欠点を持っている。実際パラメータによってはテクスチャが全く生成されないことも多い [1]。

そこで本研究では、反応拡散系のパラメータ空間を並列探索して様々なテクスチャを自動生成するアルゴリズムを開発する。アルゴリズムの実装は超並列計算機上で行ない、本手法の有用性を確認する。

2 反応拡散系

2.1 モルフォゲン

反応拡散系の基本的なアイデアは Alan Turing によって考えられたものである [2]。例えば動物の皮膚の模様を形成する細胞の色

は、大部分が胚の発育の間に決まるとされている。

細胞の性質（ここでは色彩とする）を決める要素として、モルフォゲンと名付けられた仮想的な化学的伝達物質の存在を仮定する。数種類のモルフォゲンが細胞組織中に存在し、それぞれの相互作用によってモルフォゲンの濃度が増える。時間が経つにつれて組織中でモルフォゲンの濃度が高い部分と低い部分が形成されていき、各細胞に含まれるモルフォゲンの濃度によってその細胞の最終的な形態が決まる。

このモルフォゲンの細胞組織中における濃度の時間変化を計算機上でシミュレートすることで、テクスチャの生成が可能である。

モルフォゲンの濃度変化は、拡散、消失、反応と呼ばれる3つのプロセスによって成り立っている。

拡散は、水にインクをたらした時のように、モルフォゲンが濃度が高い部分から低い部分へ流れ込もうとするプロセスである。一方、消失は時間が経つにつれモルフォゲンが一定の割合で失われていくプロセスである。

反応は、細胞組織中にモルフォゲンを発生させるプロセスである。どの場所にどれだけのモルフォゲンが発生するかはそれぞれのモルフォゲン間の複雑な相互作用によって決定される。生成されるテクスチャの形態は、どのように反応プロセスが進行するか大きく依存している。

2.2 反応拡散方程式

反応拡散系は、非線形の偏微分方程式によって表現することができる。二次元の細胞組織空間（濃度空間）を仮定し、そこで濃度変化が起こるとする。濃度空間は複数存在し、それらの相互作用も濃度変化に影響を与える。空間中のある点におけるモルフォゲンの濃度を $C(x, y)$ とすると、 C の時間微分 \dot{C} は以下の式で表される。

$$\dot{C} = \text{Tr}(D^T Q^T H Q D) C - bC + R \quad (1)$$

ただし、

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} a_1 & 0 \\ 0 & a_2 \end{bmatrix},$$

$$Q = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

(1) 式の右辺の各項が、それぞれ拡散、消失、反応の 3 つのプロセスに対応している。ここで a_1, a_2 は軸の方向およびそれに垂直な方向への拡散係数で、 θ はその軸の傾き、 b は消失係数、 R は反応関数を表している。

実際の計算においては、(1) 式を差分法により近似し、時間軸を細かいステップに区切って数値的に解く。濃度空間 C の初期値を与えてステップ毎の計算を進めるにつれ、空間中のモルフォゲンの濃度が徐々に変化していく(図 1)。ある程度のステップ数まで達したところで各点の濃度値に対して適当なカラーマップを与えてマッピングし、テクスチャを生成する。

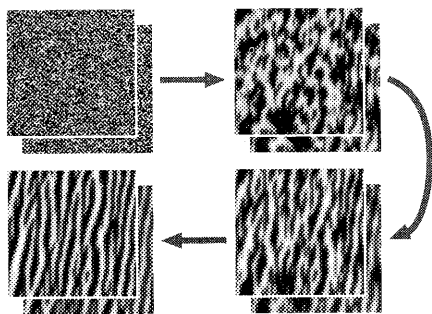


図 1: テクスチャ生成過程の例

2.3 テクスチャ自動生成の問題点

反応拡散系を計算機上でシミュレートすることにより、テクスチャを生成することが可能となるが、ここでいくつかの問題が発生する。

第一に、パラメータの設定が非常に難しいことがあげられる。設定すべきパラメータは反応関数の種類にも依存するが、少なくとも 7 ~ 8 個存在する。生成されるテクスチャの

様子はこれらのパラメータ値のわずかな違いによって大きく変化し、全くテクスチャが生成されないことも多い。また、系が非線形であるためパラメータと生成されるテクスチャの関係がつかみにくく、解析的にパラメータを設定することは容易ではない。

第二に、一つのテクスチャを生成するまでの計算時間が膨大であることがあげられる。例えば 64×64 ピクセルの濃度空間で、1000 ステップの計算を行なうのに、SparcStation20 を用いて少なくとも数分を要する。よって、パラメータを段階的に微少変化させて総当たりに実験を行なうことにより第一の問題を解決することは事実上困難である。

本研究では、これらの問題を解決するため、効率よくパラメータ空間を探索し、有効なテクスチャを生成するパラメータの組を自動的に発見することを試みる。

3 テクスチャの評価

3.1 終了状態の分類

反応拡散系を用いてテクスチャを効率よく自動生成するために、まず生成されたテクスチャの評価尺度を定めておく必要がある。

時間の流れを細かいステップに区切り、目標のステップ数を定めて計算を進めていくことはすでに述べた。しかし、パラメータの設定によっては目標のステップ数に達する前に計算が終了することがある。これを異常終了と呼び、以下の 2 つのケースがある(図 2)。

消滅 濃度空間全体が同じ濃度になり、模様が消えてしまう

発散 濃度空間が $+\infty$ と $-\infty$ の市松模様に発散し、計算不能になる

目標ステップ数まで計算が進行した場合を正常終了と呼ぶ。しかし正常終了の場合でもテクスチャとして利用価値が全くないものが数多く含まれる。パラメータの自動設定を行なうためには、正常終了したテクスチャに評

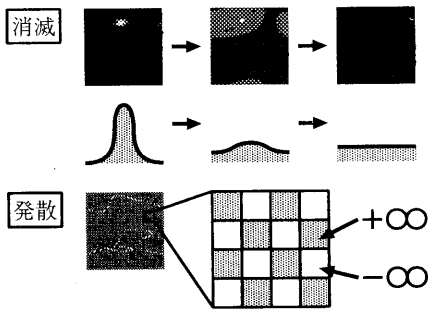


図 2: 異常終了

値を与え、よし悪しを判別することが必要になる。

3.2 パワースペクトルによる評価

正常終了で生成されたテクスチャに対して 2 次元のフーリエ変換を施し、パワースペクトルを用いて評価値を与える。

反応拡散系を用いて生成されたテクスチャは縞模様の成分を含むことが多く、そのパワースペクトルは局所的に高調波成分を含む (図 3 下-左・中)。そこで、スペクトル分布の原点からの距離に基づいてテクスチャを評価する。

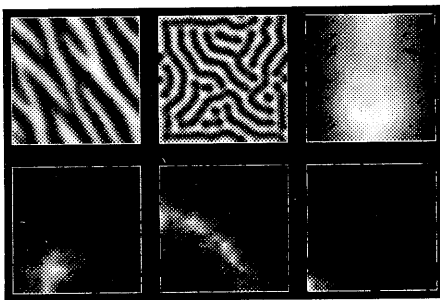


図 3: 生成されたテクスチャ (上段) とそのパワースペクトルを拡大したもの (下段)

分布はパワースペクトルの四隅に点対称に現われる。そこで片側の 2 箇所に関する

て原点を通る複数の直線で切断し、原点からの距離と強度の関数を複数生成する。次にそれらの関数を全て足し合わせ、評価関数とする。最後に評価関数の原点からの距離の平均を求め、それがテクスチャの評価値となる (図 4)。

また、評価関数の分散も同時に観測し、分散があまりにも大きいテクスチャに関しては評価値を大幅に減らすこととする。

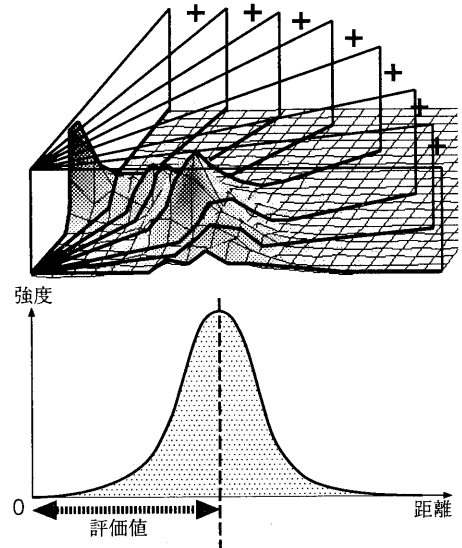


図 4: 評価関数の生成

このようにして与えられるテクスチャの評価値は、テクスチャの有効度を測る尺度として利用することができ、図 3-右のような、テクスチャとしての値が低いものをほぼ確実に排除することが可能である。

4 テクスチャの進化

本研究で提案するパラメータ自動設定アルゴリズムは、あるテクスチャ (親テクスチャ) のパラメータをひとつだけ選んで変更した子テクスチャを生成し、この操作を繰り返して探索木を形成することによりテクスチャを進

化させていくものである。親テクスチャと子テクスチャ双方の評価値を比較して、次世代のテクスチャのパラメータをコントロールし、適切なパラメータを探索していく。

この手法は遺伝的アルゴリズムの概念を採り入れたテクスチャの進化的生成法（例えば [5] など）とは異なり、テクスチャを特徴付けるパラメータの列を遺伝子として持っていない。

これは、反応拡散系がパラメータの変化に対して非常に敏感なため、パラメータの列にクロスオーバーなどの遺伝的操作を行なってもほとんど意味をなさないためである。

4.1 初期設定

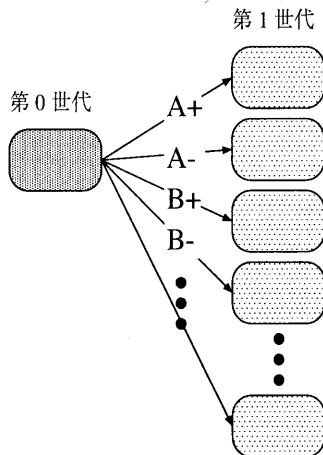


図 5: 子テクスチャの生成

はじめに、各パラメータの初期値、及びどのパラメータを調整可能にするかを定める。次にそのパラメータで生成された第 0 世代のテクスチャに対し、調整可能な全てのパラメータをわずかに増減させた第 1 世代のテクスチャを生成する。ひとつの子テクスチャには、親テクスチャのパラメータをひとつだけ変更したものをパラメータとして与える（図 5）。

4.2 子の生成その 1（評価が向上）

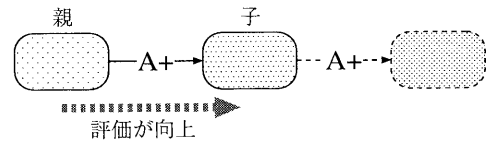


図 6: 評価が向上した場合

生成された子テクスチャに以下の変化が起こった場合、テクスチャの評価が向上したとみなす。

- 親子ともに異常終了だったが終了するまでのステップ数が増加した
- 異常終了だったものが正常終了になった
- 親子ともに正常終了だったがパワースペクトルによる評価値が増加した

この場合は親から子へのパラメータ変化が適切であったと考えられる。よってこの方向へのパラメータ変化を繰り返せばさらに評価が向上すると予想し、同じパラメータ変化をもう一度施して新しい世代のテクスチャを生成する（図 6）。

4.3 子の生成その 2（評価が低下）

パラメータを変更することによって以下の変化が起こった場合、テクスチャの評価が低下したとみなす。

- 親子ともに異常終了で、終了するまでのステップ数が減少した
- 正常終了だったものが異常終了になった
- 親子ともに正常終了だったがパワースペクトルによる評価値が減少した

このような場合は、この親子間のパラメータ変化は失敗だったと考え、生成された子テクスチャを廃棄し、親テクスチャの別のパラメータを変化させて新しいパラメータを模索する。その際、初期設定時と同様に、全ての

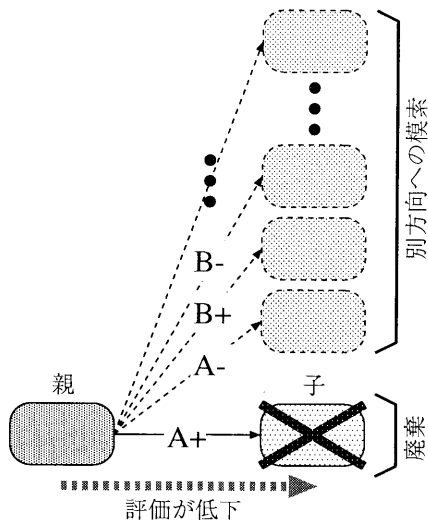


図 7: 評価が低下した場合

パラメータを増減させて複数の子テクスチャを生成する (図 7)。それらの子の評価が全て低下していた場合には、その枝の探索を終了する。

5 超並列計算機への実装

以上述べたアルゴリズムは、パラメータ空間を全探索に近い形で探索するためかなりの計算量が必要であり、一般のワークステーション上に実装しても、実用的な速度は得られない。そこで、このアルゴリズムを分散メモリ型の超並列計算機 SR2201 (日立製, 300Mflops × 128 台) 上に実装した。

実装の形態を図 8 に示す。全プロセッサ中、一つを Control Tower (司令塔) に、それ以外のプロセッサを実際に計算を行なう Texture Generator に割り当てる。Control Tower は主に以下の仕事を行なう。

- テクスチャの木の管理
- タスクの生成
- タスクの管理

Control Tower は、生成したタスク (パラメータの組) を待ち行列に投入する。仕事のない Texture Generator は待ち行列を監視し、タスクがあればそれを受け取り、なければタスクが生成されるまで待つ。

Texture Generator はタスクを受け取ると、そのパラメータに基づいてテクスチャを生成し、結果 (評価値等) を Control Tower に返す。Control Tower はその結果を解析して新たにタスクを生成し、待ち行列に投入する。

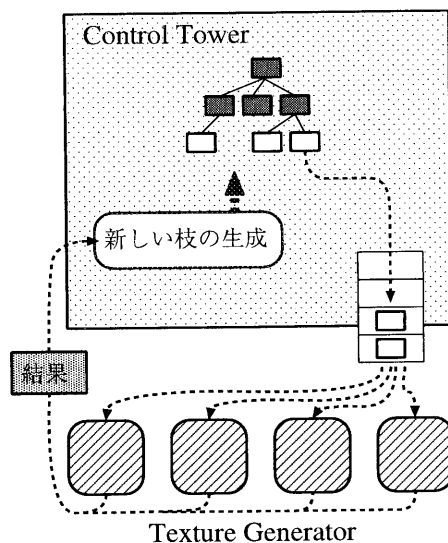


図 8: 超並列計算機への実装

6 結果と今後の課題

以上のシステムを用いて自動生成されたテクスチャを、実際の CG におけるテクスチャマッピングに応用した例を図 9 に示す。反応拡散系は濃度空間を 2 次元のトーラス空間として計算するため、生成されたテクスチャを並べても継ぎ目が生じない。このことがテクスチャマッピングにおける実用性をより高めている。

また、パラメータの設定例として、図 10 を

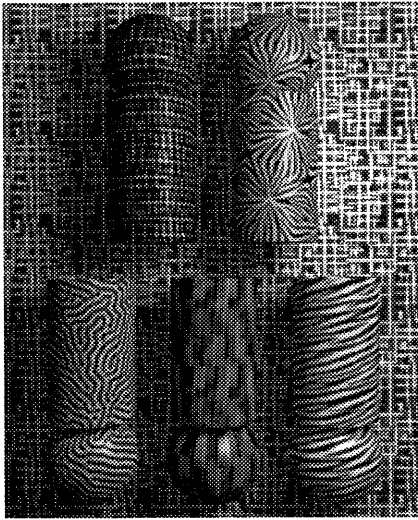


図 9: テクスチャマッピングへの応用例

生成する際に与えた反応関数と各パラメータ値を以下に示す。

- 2つの濃度空間 C^+, C^- : $[-1, +1]$ の乱数で初期化
- 反応関数 : $R = \begin{cases} k & \text{if } C^+ > C^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
- その他の各パラメータ :

$$\Delta t = 0.02, h = 0.7$$

	a_1	a_2	b	k
C^+	2.0	1.0	1.0	1.0
C^-	2.0	1.5	1.0	1.0

これらのテクスチャは、異方性拡散という手法を用いて生成した。これは拡散の概念を若干拡張したもので、モルフォゲンが拡散する方向によって拡散の割合を変化させるために使われる。水平方向への拡散係数を大きくしたものが図 10-左で、空間中の領域によって拡散の主軸を変えたものが図 10-右である。

テクスチャの進化の系列の一例を、図 11に示す。世代を重ねるにつれ、生成されるテクスチャが興味深い変化を示している。

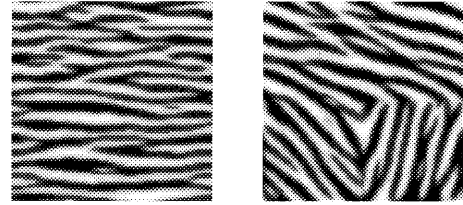


図 10: 異方性拡散を用いたテクスチャ

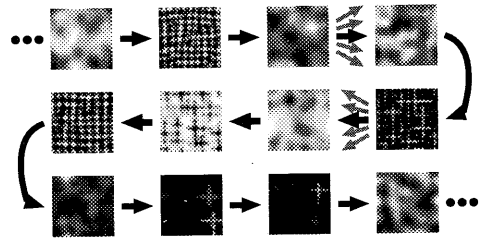


図 11: 進化の系列

本研究の最終目標は、自分の望みのテクスチャを簡単な操作で生成できる、いわば Texture Navigator とでも呼ぶべきツールを開発することである。

しかし、本稿で述べたパラメータ設定アルゴリズムは、ある与えられた反応関数に対してそれにマッチするパラメータを発見することを目的としたものであり、生成される模様を自分の目的通りにコントロールすることはほぼ不可能である。

生成されるテクスチャの幅を広げるためには、反応関数そのものを自動生成するシステムを開発する必要がある。

本稿で述べたテクスチャの評価法は、単にテクスチャの複雑度を測定するものにすぎない。テクスチャの美しさまでも判断できる評価法は、今後の課題である。

7 おわりに

本研究では、反応拡散系を用いて生成されたテクスチャにパワースペクトルを用いて評価値を与え、これを利用してパラメータの設定を自動化するアルゴリズムを提案した。また、本アルゴリズムを超並列計算機上に実装し、効率よくテクスチャが生成される事が確かめられた。

今後は、さらに多様なテクスチャを自在に生成することをめざし、反応関数の自動生成、より高度なテクスチャ評価法の開発、テクスチャのカラー化等を行なう予定である。

参考文献

- [1] 中森工慈, 高井昌彰, 佐藤義治: “反応拡散系を用いたテクスチャの自動生成”, 情報処理北海道シンポジウム '95 予稿集, pp.96-97, 1995
- [2] Alan Turing: “The Chemical Basis Morphogenesis”, *Philosophical Transactions of the Royal Society(B)*, Number 237, pp.37-72, 1952
- [3] Andrew Witkin and Michael Kass: “Reaction-Diffusion Textures”, *Computer Graphics*, Volume 25, Number 4, pp.299-308, July 1991
- [4] Greg Turk: “Generating Textures on Arbitrary Surfaces Using Reaction-Diffusion”, *Computer Graphics*, Volume 25, Number 4, pp.289-298, July 1991
- [5] Karl Sims: “Artificial Evolution for Computer Graphics”, *Computer Graphics*, Volume 25, Number 4, pp.319-328, July 1991