

氏名（本籍）	いとう こういち 伊藤 康一（宮城県）
学位の種類	博士（情報科学）
学位記番号	情博第305号
学位授与年月日	平成17年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科、専攻	東北大学大学院情報科学研究科（博士課程）情報基礎科学専攻
学位論文題目	反応拡散モデルに基づく画像生成・処理システムの研究
論文審査委員	（主査）東北大学教授 青木 孝文 東北大学教授 根元 義章 東北大学教授 中尾 光之

## 論文内容要旨

### 第1章 緒言

近年、コンピュータの発達に伴い、さまざまな分野で画像処理が活用されている。このような画像処理は、入力された画像から有用な情報を取り出して処理するような処理がほとんどである。たとえば、画像の特徴となるような特徴点を抽出して画像間の類似度を調べたり、画像を解析したりする処理がある。また、画像の中に含まれているノイズなどのような重要ではない情報を取り除き、画像を鮮明にする処理もある。これに対し、本論文では、能動的に画像を生成する処理を伴うような新しい画像処理システムを提案する。具体的には、画像から有用な情報を取り出すのではなく、有用な情報を自発的に生成するような能動的な信号処理システムを提案する。このような能動的な処理を実現するために、本論文では、生物の表皮模様（皮膚模様）の生成や生体现象のモデルとして知られている反応拡散モデルを利用した画像処理システムの構築と新しい画像処理のパラダイムを提案することを目的とする。

本論文で提案するシステムの基本モデルである生物の表皮模様（皮膚模様）の生成や生体现象のモデル（反応拡散モデル）は、一般的に連続系の反応拡散方程式で記述されることが多い。1952年に、計算機科学の分野で有名な Turing が、生物のパターン形成全般に働く基本的なメカニズムとして、拡散不安定性に基づく反応拡散波の発生を予言し、反応拡散方程式を用いて生物のパターン形成メカニズムを数理モデル化した。このモデルを工学的な観点から信号処理などの分野に応用するアプローチも存在するが、必ずしもデジタル信号処理の枠組みでの取り扱いに適するとは限らない。そこで、本論文では、これまでに提案してきたデジタル反応拡散システム（Digital Reaction-Diffusion System: DRDS）と呼ばれる離散時間・離散空間で定義された抽象的な反応拡散系のモデルに基づいた能動的パターン生成に基づく信号処理システムを提案する。DRDS を利用すると、反応拡散モデルを多次元デジタル信号処理の立場から系統的に解釈することができ、デジタル信号処理やコンピュータグラフィックス、計算幾何学などの分野へ応用できると考えられる。本論文では、DRDS を使った指紋画像復元アルゴリズムと最短経路探索アルゴリズムを提案した。

## 第2章 反応拡散モデルに関する基礎的考察

生物の世界で見られるパターン形成現象は、化学反応と分子拡散（物質の移動）をメカニズムとする反応拡散系として記述できる現象が多く見られる。1952年に、計算機科学の分野で有名な Turing は、生物の形態形成全般に働く基本的なパターン形成のメカニズムとして、拡散不安定性に基づく反応拡散波の発生を予言した。具体的には、「2つの仮想的な物質（モルフォゲン）がある条件を満たしてお互いの生成をコントロールするとき、その物質の濃度分布は、濃度の高い部分と低い部分とが空間に繰り返しパターン（反応拡散波）を作って安定する」ことを示した。ここで、拡散不安定性とは、拡散的相互作用によって系が不安定化し、空間パターンを発生する性質のことである。特に、Turing の示唆した拡散不安定性を満たすことによって生成される空間パターン（反応拡散波）を Turing パターンと呼んでいる。反応拡散モデルは、不安定な非線形ダイナミクスから能動的に空間パターンを生成することができる。このようなモデルをデジタル信号処理の枠組みで活用することにより、能動的な画像生成を伴うような新しい信号処理のパラダイムを与えられる。

## 第3章 デジタル反応拡散システム

本章では、能動的にパターンを生成する信号処理システムであるデジタル反応拡散システム (Digital Reaction-Diffusion System: DRDS) について述べる。DRDS の一般形は、連続系で定義される反応拡散システムの濃度ベクトルを時間  $t$  および空間  $(n_1, n_2)$  に対して、それぞれサンプリング周期  $T_0$  および  $(T_1, T_2)$  で離散化することにより次式として得られる。

$$\mathbf{x}(n_0 + 1, n_1, n_2) = \mathbf{x}(n_0, n_1, n_2) + \mathbf{R}(\mathbf{x}(n_0, n_1, n_2)) + \mathbf{D}(l * \mathbf{x})(n_0, n_1, n_2)$$

ここで、 $n_0$  は時間のインデックス、 $(n_1, n_2)$  は空間のインデックス、 $\mathbf{x}$  は  $M$  種類の物質の濃度、 $\mathbf{R}$  は非線形反応関数、 $\mathbf{D} = \text{diag}[D_1, D_2, \dots, D_M]$  は拡散係数、 $*$  は空間たたみ込みである。また、 $l(n_1, n_2) = 1/T_1^2$  ( $(n_1, n_2) = (-1, 0), (1, 0)$  のとき)、 $1/T_2^2$  ( $(n_1, n_2) = (0, 0)$  のとき)、 $-2/T_1^2 - 2/T_2^2$  ( $(n_1, n_2) = (-1, 0), (1, 0)$  のとき)、 $0$  (その他) である。DRDS のパラメータを適切に設定することで、さまざまな生物系パターンを生成することができる。生成したパターンの例を図 1 に示す。これらは、初期入力画像として、平衡点近傍の微小な濃度変化を与え、適当なパラメータを設定してパターンを生成した。これらのパターンを見ると、生物の表皮模様と類似したパターンや複雑な（カオスのような）パターンが生成されていることがわかる。このように、DRDS を使うことで、自発的に信号や画像を生成するような能動的な信号処理アルゴリズムを考えることができる。

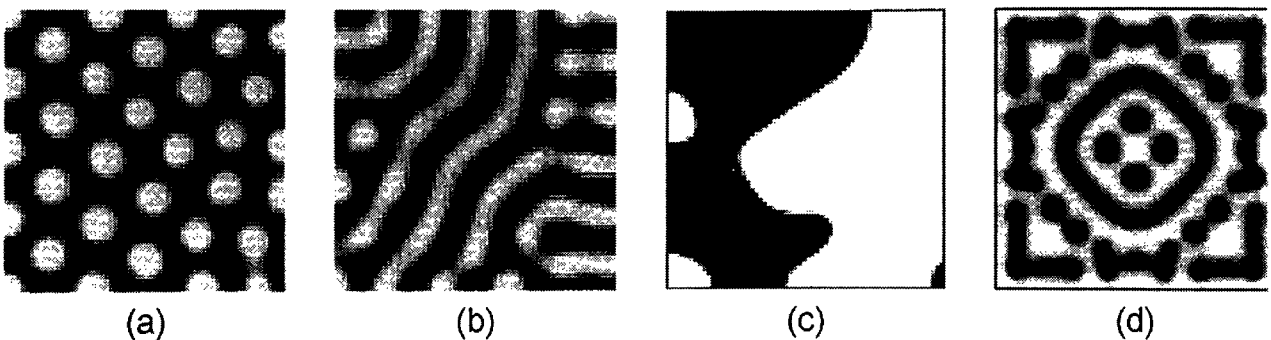


図 1 DRDS を使って生成したさまざまな生物系パターン

## 第4章 指紋画像処理への応用

本章では、DRDS のパターン生成能力を利用して情報の欠落した指紋画像から元の指紋パターンを復元する応用について述べる。指紋に関する画像処理として、指紋画像の強調と復元の2つがある。現在までに行われている研究のほとんどは、指紋画像の復元よりも指紋画像の強調がほとんどである。報告されている指紋画像強調アルゴリズムは、入力された指紋画像からできる限り多くの特徴点を抽出するために、原画像の隆線などの特徴を変えないように、指紋画像に含まれている有用な情報のみを取り出して強調するような受動的な画像処理を行うアルゴリズムである。たとえば、指紋の隆線方向に沿ってフィルタをかけることによりかすれた指紋画像を強調するアルゴリズムが報告されている。これらで使われているのは、Gabor フィルタなどの Gauss 関数のようなフィルタである。このようなフィルタは、パラメータを調整することで、局所画像の角度と周波数を適切に選択して強調することができる。しかし、情報の欠落の度合いが大きい場合は、指紋画像を強調することができない。

本論文で考えている問題は、大幅に情報の欠落した指紋画像から元の指紋パターンを復元する問題である。この問題を解決するためには、指紋画像から有用な情報を取り出すのではなく、新たにパターンを生成する必要がある。これに対し、反応拡散モデルを使った能動的な画像処理を利用することで、情報の欠落した部分を正確に補間するような指紋パターンを生成することができる。反応拡散モデルを指紋画像強調に使用するというオリジナルなアイデアはすでに報告されているが、この報告では、連続系の微分方程式でシステムが定式化されている。また、指紋画像強調のみの限られた応用例しか報告されていない。これに対し、本論文では、DRDS を使って大幅に情報の欠落した指紋画像から元の指紋パターンを復元するアルゴリズムを提案した。

まず、拡散する方向を指紋の隆線（紋の流れ）に沿うように改良した適応 DRDS を提案した。適応 DRDS を使うことで、任意の方向にパターン生成を制御することができる。しかし、情報の欠落している指紋画像の場合は、隆線方向を正確に求めることができない。そこで、情報の欠落した指紋画像から元の指紋パターンを復元するために、階層的に方向を求めて適応 DRDS を使って指紋画像を復元するアルゴリズムを提案した。図2に復元した指紋画像を示す。階層的に方向を求めることで元の指紋パターンを復元できることを示した。実験結果より、提案アルゴリズムを使うことで画素情報を 1/36 に減少させた指紋画像からでも元の指紋パターンを正確に復元できることを確認した。この指紋画像復元アルゴリズムは、指紋照合装置の一機能として有効に活用できると考えられる。

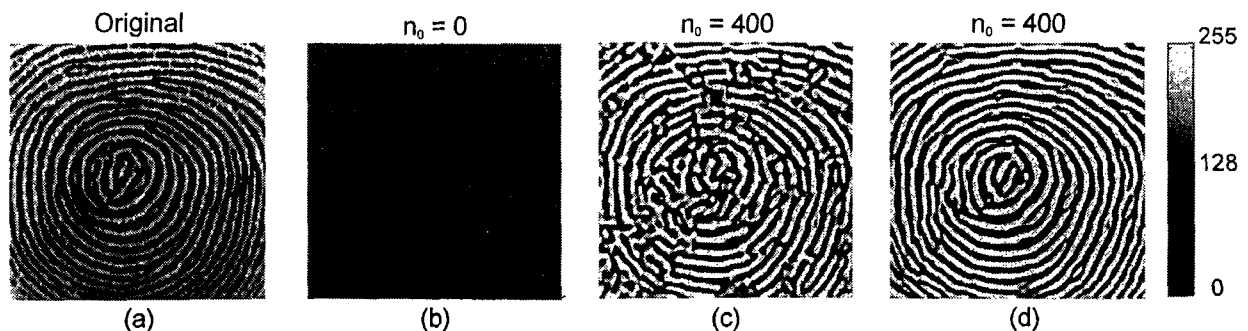


図2 情報が欠落した指紋画像の復元：(a) 原画像，(b) 画素情報を 1/36 に減少させた画像（入力画像），(c) 階層的に方向を求めずに復元した画像，(d) 階層的に方向を求めて復元した画像

## 第5章 最短経路探索への応用

本章では、DRDS を使って生成することができる動的なパターンを利用した最短経路探索について述べる。一般的に、最短経路を探索する問題は、計算幾何学やアルゴリズムの分野でよく研究されている問題である。これらの分野で取り扱っている問題は、基本的に連続系で定義された問題である。そのため、最短経路を求めるためにデジタル信号処理、特に画像処理を利用することは困難であった。これに対し、DRDS を使って生成することができる動的なパターンを利用することで、連続系で定義された最短経路探索問題を解くための離散的なグラフを生成することができる。DRDS の非線形反応関数として興奮性ダイナミクスの1つである FitzHugh-南雲モデルを用いた興奮性 DRDS を設計する。興奮性 DRDS を使うと等速度で伝搬し、他の波に衝突しても干渉しない性質を持った興奮波を発生することができる。この性質を利用し、複雑な形状の障害物が配置されたマップからでも最短経路を探索することができるアルゴリズムを提案した。

提案するアルゴリズムは、興奮性 DRDS を使って経路上に興奮波を伝搬させる Forward Operation と、伝搬した興奮波より作成されるスタート点からゴール点までの等距離面をたどって最短経路を求める Backward Operation の2つの操作で構成される。提案するアルゴリズムを使って最短経路を探索した例を図3に示す。実験結果より、与えたすべてのゴール点までの最短経路を正確に求めていることが確認できた。以上より、DRDS が生成することができる動的なパターンを利用することで、計算幾何学の問題を解くための画像処理技術を提供できることがわかった。

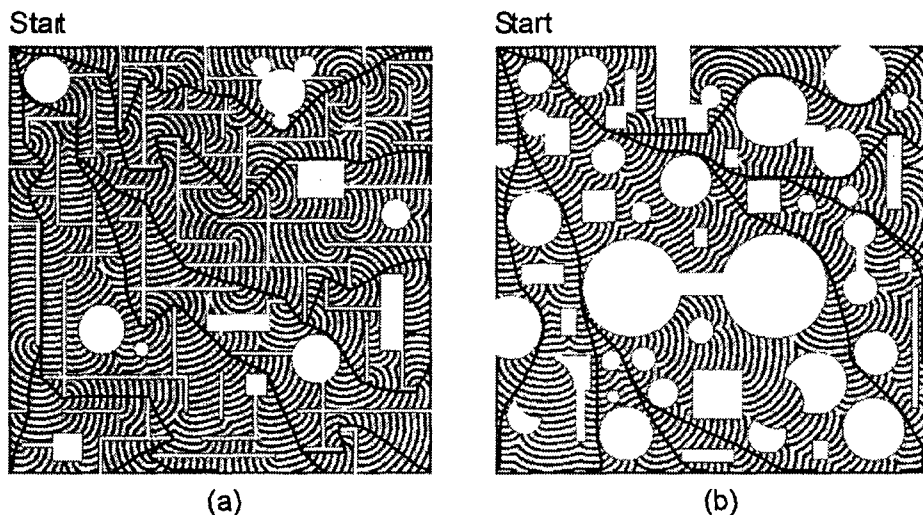


図3 提案するアルゴリズムを使って複数のゴール点からスタート点までの最短経路を求めた結果

## 第6章 結言

本論文では、反応拡散モデルに基づく新しい画像生成・処理システムの構築を目指し、連続系の反応拡散システムを時間・空間で離散化したデジタル反応拡散システム (Digital Reaction-Diffusion System: DRDS) を提案した。DRDS を使うことで、静止パターンだけではなく、動的なパターンを生成することができる。本論文では、DRDS を使った応用として、DRDS で生成できる静止パターンを利用した指紋画像復元アルゴリズムと DRDS で生成できる動的パターンを利用した最短経路探索アルゴリズムを提案し、それらの有効性を示した。

## 論文審査の結果の要旨

近年、画像や映像などの多次元信号を対象にするデジタル信号処理の応用分野が急速に拡大している。これに伴い、欠落した画像情報の復元などの本質的に困難な処理への要求が高まっており、従来の線形信号処理の枠組みにとらわれない新しい方法論の開拓が求められている。著者は、生物の形態形成現象などの解析に用いられる反応拡散モデルに着想を得た新しい画像生成・処理システムを提案し、その理論解析を行うとともに、これを指紋画像処理および最短経路探索に適用してその有効性を実証した。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒言である。

第2章では、生物の形態形成をはじめとする自然界の各種のパターン形成現象の解析に用いられる反応拡散モデルを取り上げ、システム理論の立場からの定式化と基礎的考察を与えている。

第3章では、連続系の反応拡散方程式を時間的・空間的に離散化することにより、デジタル反応拡散システム (Digital Reaction-Diffusion System) と呼ぶ新しい多次元非線形デジタルフィルタのクラスを定義している。そのパターン生成条件などに関する解析を行うとともに、各種の静的・動的なパターンを発生するデジタル反応拡散システムを設計した結果を示している。

第4章では、デジタル反応拡散システムを指紋画像処理に応用した結果について述べている。入力された指紋画像に対応する固有のパターンを発生する適応デジタル反応拡散システムを設計するとともに、これを用いて、劣化した指紋画像を復元するアルゴリズムを提案している。本アルゴリズムを位相限定相関法に基づく指紋照合方式と組み合わせた結果、識別性能の向上が達成できることを明らかにしている。これは実用上重要な成果である。

第5章では、デジタル反応拡散システムを最短経路探索に応用した結果について述べている。FitzHugh-南雲モデルに基づく興奮性デジタル反応拡散システムを設計するとともに、これが発生する興奮波の性質を利用して、複雑な障害物が配置された2次元マップにおける最短経路を求めるアルゴリズムを与えている。これは優れた成果である。

第6章は結言である。

以上要するに本論文は、自然界に見られる各種のパターン形成現象のモデルに着想を得た新しい画像生成・処理システムを提案するとともに、具体的な応用を通して有効性を実証したものであり、画像情報工学および情報基礎科学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (情報科学) の学位論文として合格と認める。