

Turing パターンを発生するシンプルな反応拡散 セルオートマトンモデルとその集積回路化

– 縞・斑点画像復元の応用に向けて –

鈴木 洋平[†] 高山 貴裕^{††} 元池 N.育子^{†††} 浅井 哲也[†]

[†] 北海道大学 大学院情報科学研究科

^{††} はこだて未来大学大学院 システム情報科学研究科

^{†††} はこだて未来大学 システム情報科学部 複雑系科学科

E-mail: †{suzuki,asai}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp, ††{g2104028,motoike}@fun.ac.jp

あらまし 本研究は、欠損や汚れのある画像パターンをリアルタイムに修復する LSI の開発を目指したものである。そのために、生物の形づくりの原理に基づいて、指紋や体模様に見られる縞・斑点などの Turing パターンを生成・修復する反応拡散モデルを提案する。その後、そのモデルを実装する反応拡散チップの並列アーキテクチャを提案する。回路シミュレーションにより、この LSI が縞（斑点）パターンを復元できることを示す。

キーワード 反応拡散系, Turing システム, 反応拡散チップ, 画像修復

A Simple Reaction-Diffusion Cellular Automaton Model generating Turing Patterns and its LSI Implementation for Restoring Stripe and Spot Images

Yohei SUZUKI[†], Takahiro TAKAYAMA^{††}, Ikuko N. MOTOIKE^{†††}, and Tetsuya ASAI[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Hokkaido University

^{††} School of Systems Information Science, Future University - Hakodate

^{†††} Department of Complex Systems, Future University - Hakodate

E-mail: †{suzuki,asai}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp, ††{g2104028,motoike}@fun.ac.jp

Abstract In this report, we propose a novel RD model that repairs Turing patterns; e.g., stripe and spot patterns observed in human fingerprints and marking patterns on various animals. Based on the model, we propose a novel LSI architecture, aiming at the development of compact and low-power silicon RD systems. By extensive circuit simulations, we confirmed that the proposed LSI could restore stripe and spot images within 10,000 clock cycles, independently of the number of pixels in the image.

Key words Reaction-diffusion system, Turing system, reaction-diffusion chip, image restoration

1. まえがき

生物は発生の過程で、1個の卵(細胞)が分裂を繰り返して分化し、性質の異なる細胞集団群へと成長する。Turingはこのような空間一様状態から安定な空間非一様状態へと移行する現象に対して、1952年に拡散不安定性という概念を提唱した。彼は物質の時間変化を反応(局所的な物質の生成・消滅)と拡散(近隣領域との平均化)の和で記述し、拡散項がなければ定数解を持つ系が、拡散が加わることによって空間一様解が不安定化し、安定な空間非一様解が出現する場合があることを示した。この物質(状態)の時間変化を反応と拡散の和で記述する枠組みは、反応拡散モデルと呼ばれる。

自然界には多種多様なパターン(模様)が存在する。身近なものには、貝殻や動物の模様などがあるが、これらの特徴のひとつは自己組織的にパターンが形成されることである。後天的に動物の体表パターンの一部を欠損させた場合にも、周りの状況に応じてパターンが修復されることが実験的にも確認されている。近年、これらのパターン形成が上述の反応拡散モデルによってよく再現されることがわかってきた。中でも Turing モデルと呼ばれるモデルでは、パラメータによって斑点や縞柄などのパターンが安定な状態として出現することが知られている。

本研究では、生物の模様形成に見られる自己組織的なパターン形成ダイナミクス・Turing モデルを応用し、指紋や虹彩、体模様などに見られる縞・斑点などのパターンの欠損を修復する LSI の基本アーキテクチャを考案する。さらに、センサー体型の処理構造(インテリジェントセンサ化)を眺望に入れ、生物の自発的パターン形成の原理に基づいてパターン処理を高度に並列化し、処理するパターンの画素毎に単位処理回路とセンサ(画像センサ)を搭載可能なアーキテクチャを提案する。

2. モデル

本研究では、生物の体の柄(斑点、豹柄、縞柄などの)パターンを発生するモデルの手本として、反応拡散系に着目する。反応拡散系とは、非平衡状態において反応現象と拡散現象が混在したシステムのことを言う。物質やエネルギーの流れをともし非平衡-開放系では、反応の非線形性が著しく強調されて、平衡系からは予想もつかない動的で多様性に富む世界が出現する。生物に見られる様々なパターンはその典型例であり、特に斑点や縞柄などのパター

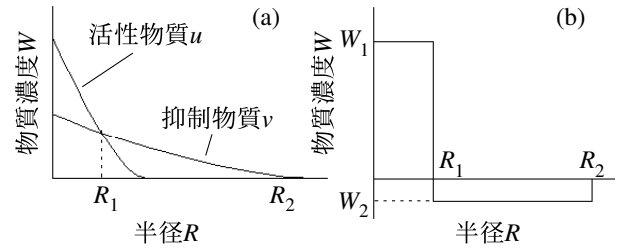


図1 活性物質と抑制物質の拡散作用の概要。
(a) 連続モデル; (b) 離散モデル。

ンは Turing パターンと呼ばれる。

Turing パターンは、通常反応拡散方程式(偏微分方程式)を解くことで得られる。したがって系の時間・空間・状態は連続値であらわされる。一方、より少ない計算資源を用いてパターンを再現するための試みも、これまでいくつかなされてきている。その代表的なものは、空間全体を不連続なセルの集まりとし、各セルの状態が不連続な離散値で記述される「セルオートマトン系」での再現である。しかしこの場合、時間発展方程式を条件分岐ルールで書き換えるため、方程式に含まれる非線形ダイナミクスをどの程度単純化するかが問題となる。

よく知られた反応拡散系のセルオートマトンモデルのひとつに、Markus らによるもの [1] が挙げられるが、そのアルゴリズムは連続系のダイナミクスを忠実に離散化したもので、複雑なルール構成となっている。これに対し、Young は非常に単純化した離散モデルを提案した [2]。ここで彼は、物質の拡散作用自体を離散化し、通常は活性物質・抑制物質の二物質(二変数)で表される各セルの状態を、二値 $\{1,0\}$ の一変数でまとめて表したのである。さらに二物質の拡散をも非常に単純化した。

Turing パターンを形成する条件のひとつに、活性物質の影響は近隣領域に限られる(拡散しにくい)一方、抑制物質の影響は遠くまで及ぶ(拡散しやすい)ことがある。着目した点からの活性物質・抑制物質の拡散は、連続系では、該当点からの拡散距離を R とすると、図 1(a) のようになる。距離 R_1 内の領域では活性物質が抑制物質より多く拡散するため、結果として活性効果が得られる。一方、距離 $R_1 < R < R_2$ では抑制物質が活性物質より多く拡散するため、結果として抑制効果が得られる。

Young はこの距離による効果の違いを図 1(b) のように単純化した。すなわち、状態 1 であるセルからの効果を、距離 R_1 内の領域では正の効果 W_1 (活性効果)、距離 $R_1 < R < R_2$ では負の効果 W_2 (抑制

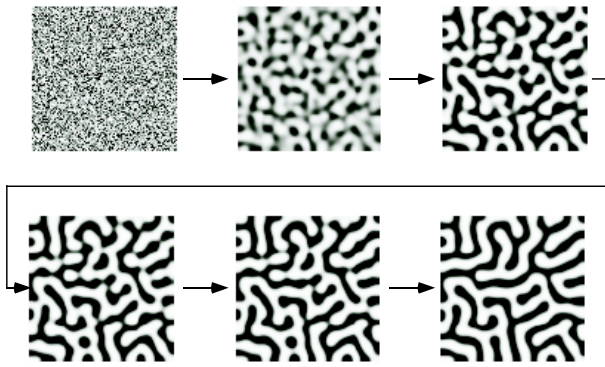


図2 提案モデルにおける縞模様の形成過程

効果)とした[図1(b)]。そして、位置 \mathbf{r} にあるセルの状態の時間発展は、距離 R_2 内にある状態1のセルからの寄与 W の総和 $\sum_{|\mathbf{r}-\mathbf{r}_i| \leq R_2} W$ で決まるとした。もし総和が0であれば状態は変化しないが、正であれば次ステップ時に状態は1に、負であれば状態は0に変化する。この総和に対する次ステップのセル状態の決定ルールが“反応”に相当するともいえる。以上のルールを用いて、彼は R_1, R_2, W_1 を固定し、 W_2 を変えることで斑点状や縞状のパターンが現れることを示した。ここで着目すべきことは、ランダムな初期値から始めたとしても、ほぼ10ステップ以内にこれらのパターンが安定に出現するということである。

Young のモデルは、拡散効果を単純化して(近傍の各セルからの拡散値の総和を求めることで反応拡散方程式の拡散項を記述し)、後に総和の正負を次ステップ時の状態に反映させることで、反応項に相当する作用を記述しているとも言える。したがって各セルの時間発展を知るためには、大まかにいって各セルに対してそれぞれ $\pi \times R_2 \times R_2$ 個の近傍セルを参照する必要があり、 R_2 が大きければ大きいほど計算時間は膨大なものとなる。また拡散及びセル状態への反映をステップ関数的に行っているため、得られるパターンの滑らかさには欠ける。これらの問題点に対して、拡散過程に関しては、連続拡散方程式の差分化による4近傍のみのセル参照(局所相互作用)が、また反応過程に関してはステップ関数に代わるシグモイド関数の採用が改善案として考えられる。本論文ではYoungのモデルの考え方を踏襲しつつも、以上の問題点を考慮に入れ、局所的な相互作用のみで、滑らかな斑点状もしくは縞状パターンを安定に形成する、回路の設計に適したモデルを提案する。

提案モデルでは、各セルにおける近傍セルからの活性物質及び抑制物質の総和演算を、二変数の拡散

場により行う。つまり、活性物質および抑制物質はそれぞれ別の媒質上を拡散し、それぞれのセルで積み込まれる。各セルは、その位置における活性物質から抑制物質を引いた値の正負によって、次の状態を決定する。具体的には、まず内部状態として活性因子 u 、抑制因子 v の2変数の拡散方程式を δt だけ時間積分する。拡散後の各セル活性因子 u と抑制因子 v の差 $(u-v)$ の値をシグモイド関数に与える。系のダイナミクスは

(1) (拡散)

$$\partial u(\mathbf{r}, t) / \partial t = D_u \nabla^2 u(\mathbf{r}, t),$$

$$\partial v(\mathbf{r}, t) / \partial t = D_v \nabla^2 v(\mathbf{r}, t),$$

(2) (反応)

$$u(\mathbf{r}, \delta t(n+1)) = v(\mathbf{r}, \delta t(n+1)) = f(u(\mathbf{r}, \delta t \cdot n) - v(\mathbf{r}, \delta t \cdot n) - c), f(x) = (1 + \exp(-\beta x))^{-1},$$

となる。ここで、 n は時間ステップ、 $\mathbf{r} = (x, y)$ 、 c はシグモイド関数のオフセット、 β は関数の傾きを表わす。このシグモイド関数の値が各セルを次の状態となる。以上を1サイクルとし、これを繰り返し計算する。

図2に、初期値として u, v に0から1の間のランダム値を与えた場合のパターンの形成過程を示す($D_v/D_u = \beta = 10, c = 0, \delta t = 1$)。およそ10サイクルで縞の概要が形成される。このパターンは、初期パターンの分布構造をもとに空間を縞模様で埋め尽くしたものである。例えば指紋などの縞構造を与えると、グローバルな縞構造に反した傷や欠損などの局所パターンは、縞構造に置き換えられる(周りの空間構造にしたがって修復される)。

図3に、 D_v/D_u および c の変化に対するパターンのダイアグラムを示す。 c の値を増やすと白斑点状から縞状、そして黒斑点状のパターンへと連続的に変化(グローバルパターンの形状が変化)する。また D_v/D_u の値により、グローバルパターンの空間周波数が変化する。つまり、1) 発生・修復したいパターンの形状(縞もしくは斑点)、および2) 発生・修復したいパターンの解像度、がパラメータにより調整可能である。

上記の性質は、Youngのモデルと質的に同じものであるが、大きな違いは、極めて滑らかなパターンが得られることにある。また、提案モデルは、Youngのモデルにおける物質の積み込み演算を、近接相互作用のみで表わせる拡散過程で置き換えたものであり、このことが、回路の構成を大幅に簡略化する(局所配線のみで回路が構成可能になる)。したがって、提案モデルは、滑らかな斑点状もしくは縞状パター

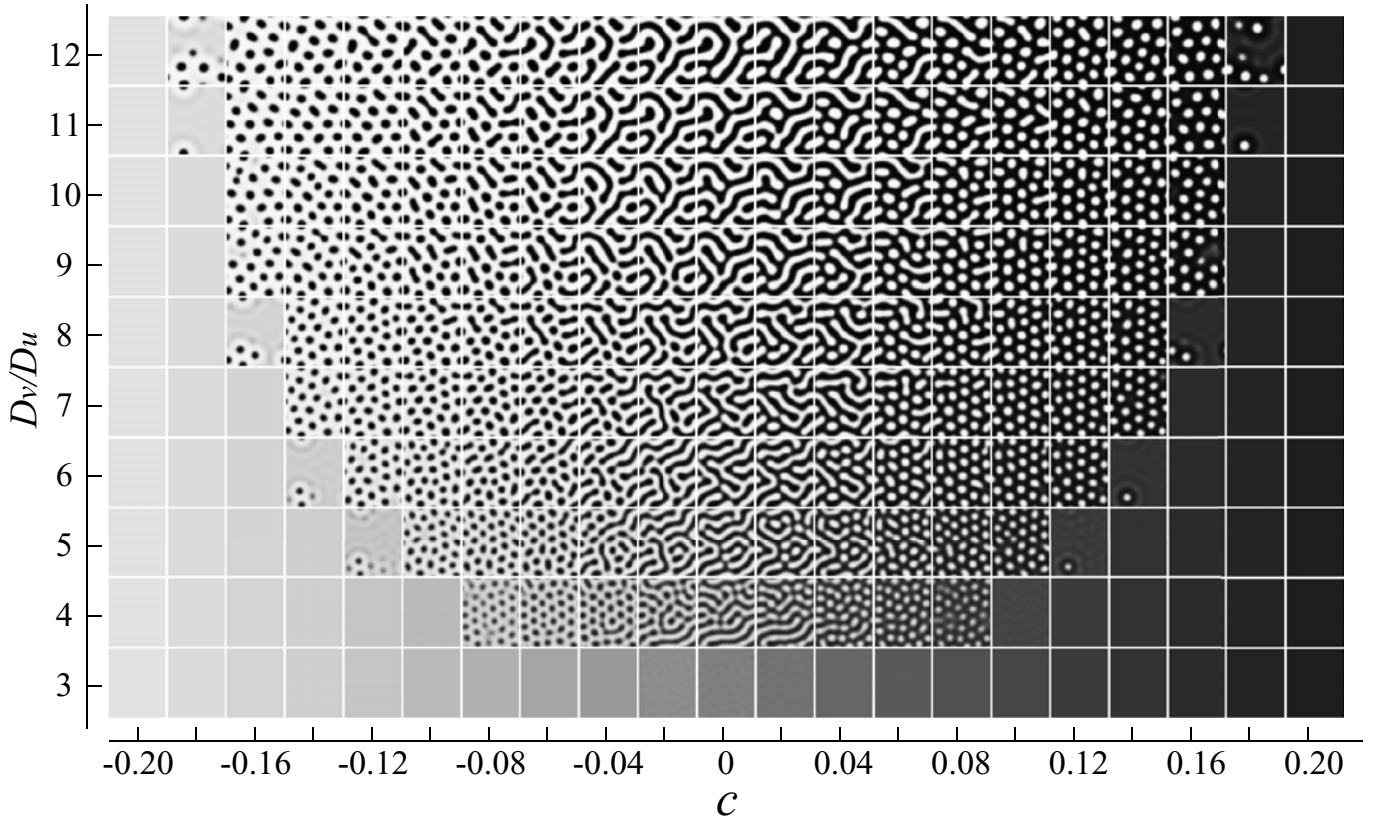


図3 提案モデルのパターンダイアグラム

ンを安定に形成する、LSI 化に適したモデルであると言える。

3. 提案 LSI アーキテクチャ

前章で提案したモデルを実装するアーキテクチャを考案する。基本設計方針は、二次元セルオートマトン構造を用いて、1) 各セルが状態メモリ、シグモイド特性を有する差動アンプ、および拡散回路を有する、2) セル間を局所配線のみで結び、配線の複雑度を下げる、の二点である。

図4に、提案する単位セル回路を示す。回路は、状態変数の主メモリ (C_{m1} と C_{m2} : マスタスレーブ型)、一時メモリ (C_{ma}), floating gate (FG) 構造による拡散回路、シグモイド関数をつくる差動アンプ (DIF), および複数のバッファ (ボルテージフォロア VF1~VF3) とトランスファークロークからなる。

拡散回路部の動作から説明する。まず、4近傍セルの主メモリの値を V_n, V_w, V_s, V_e 、自セルの主メモリの値を V_c 、FG の電位を V_{fg} とし、FG の初期電荷は零とする。ボテージフォロア VF1 の入力容量 C_{ox} が制御ゲート容量 C よりも十分小さいとすると、FG の電位は

$$V_{fg} = \frac{V_n + V_w + V_s + V_e + 4V_c}{8}$$

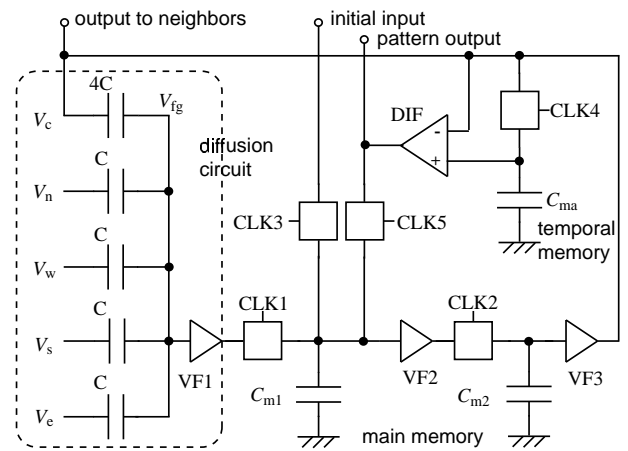


図4 1セルの回路構成

となる。ここで、 V_{fg} の値を記憶できるとして、 $V_{fg} = V(t + \Delta t)$ 、 $V_c = V(t)$ とすれば、上式は

$$\frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} = \frac{V_n + V_w + V_s + V_e - 4V(t)}{8\Delta t}$$

となる。これは、拡散方程式

$$\partial V(\mathbf{r}, t) / \partial t = D \nabla^2 V(\mathbf{r}, t),$$

を正方グリッド上で離散化 ($h \equiv \Delta x = \Delta y$) したものと等価である [$D = h^2 / (8\Delta t)$]。したがって、 V_{fg} の値を主メモリに格納し、その値を逐次更新していくことで、拡散方程式を並列に解く回路構造が生ま

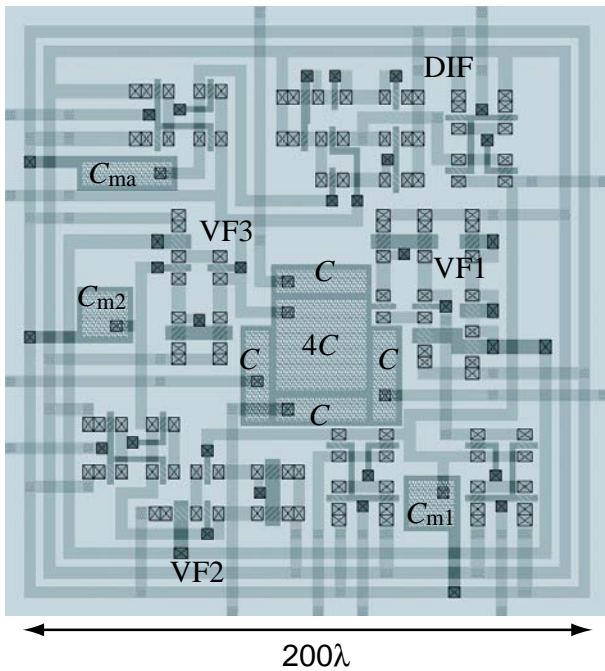


図5 単位セルのレイアウトパターン ($c = 0$, β 固定を想定した基本レイアウト。センサデバイスは未搭載)

れる。図4の回路では安全のため、 C_{m1} , C_{m2} , VF2, VF3 からなるマスタ・スレーブ型の主メモリ回路を用いる (CLK1, CLK2 により制御)。

前章の提案モデルは二種類の拡散場 (u, v) が必要であったが、そのために上記の FG デバイスを二つセルに組み込むことは、集積度の面であり好ましくない。そこで、一種類の拡散場と一時メモリを用いて、提案モデルと等価な演算を行う。拡散方程式は、時間と拡散係数の積 ($D \cdot t$) をパラメータとした解を持つことから、時間と拡散が互いに可換である。たとえば、 $D_v/D_u \equiv \Delta t_0/\Delta t_1$ として、一つの拡散場で Δt_0 だけ初期入力を拡散した後、その状態を一時メモリ (C_{ma}) に保存して、さらに $\Delta t_1 - \Delta t_0$ だけ拡散する。このときの主メモリの値は拡散係数 D_v で Δt_0 だけ拡散した値に等しい。一時メモリ (C_{ma}) には、 D_u で Δt_0 だけ拡散した値が保存されているため、結果として、一つの拡散場で、 D_u, D_v の異なる拡散係数で Δt_0 だけ拡散した値が得られる。

1 サイクルの拡散終了後に、主メモリと一時メモリの値をサブスレッショルド動作の差動アンプ (DIF) に入力することで、シグモイド特性を得る。オフセット (提案モデルのパラメータ c) の調整は、差動対の MOS FET に FG 構造を用いることで容易に実現できる。ただしこの場合、空間パターンの滑らかさを決めるパラメータ (β) は固定となる (作り込み FG 構造の容量比で β が決まる)。差動アンプの出力

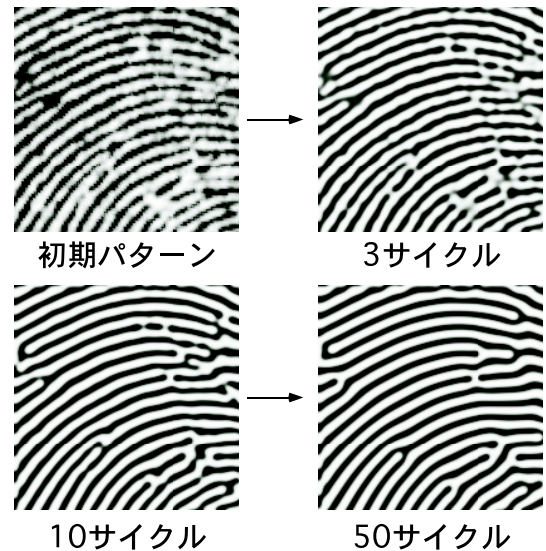


図6 指紋画像の修復過程

は、CLK5 で次ステップの初期値として C_{m1} に取り込む。CLK3 は初期パターン入力の制御クロックで、単位セル毎に搭載するフォトダイオードや静電容量センサなどから初期状態を電圧として主メモリに取り込む。

以上の回路を、基本的なプロセス (n-well double-poly double-metal CMOS process) を仮定して設計した。そのレイアウトパターンを図5に示す (λ はスケールパラメータを表わす)。

4. シミュレーション結果と課題

前章のセル回路を 180×180 個配置して、シミュレーションにより基本的な動作確認を行った。パラメータは、 $C = 100$ fF, $C_{ox} = 1$ fF, $C_{m1} = C_{m2} = C_{ma} = 100$ fF, $D_v/D_u = 10$ とした (1 サイクル 80 ステップとし、8 ステップ拡散後さらに 72 ステップ拡散, 1 ステップの実行には 2 clock 必要)。

図6に、 $c = 0$ の場合のパターンの形成過程を示す (セルのパターン出力電圧を濃淡で表示)。図3より、このパラメータにおける系のグローバルパターンは縞模様であることがわかっているため、初期入力には指紋画像を用いた。時間の経過とともに、ノイズや傷などの局所パターンが、周囲の構造にしたがって修正されることを確認した。なお、パターンが安定するまでに 50 サイクル (8,000 clock) を要した。また、 $c = 0.16$ (DIF のオフセットは $0.16 \times V_{dd}$) の場合のパターンの形成過程を図7に示す。初期入力は図6と同じものである。図3の予想通り、斑点状のパターンが得られた。その形成過程は、図6と同様、グローバルパターン (斑点) と異なる局所パターン

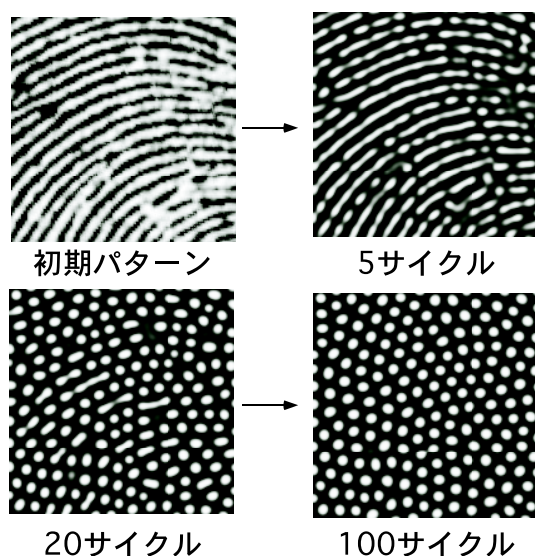


図7 指紋画像入力に対する斑点出力パターン

が周囲の構造にしたがって修正される、というものである。したがって、水玉模様のような等間隔の斑点からなる画像の修復に適している。なお、パターンが安定するまでに100サイクル(16,000 clock)を要した。

パターンが安定するまでのサイクル数は、縞模様の線の幅(斑点の大きさ)にのみ依存し、画像の大きさには影響しない。そのため画素数が増えた場合、繰り返し演算量に関わる消費電力が、大幅に低減できる。差動アンプは主メモリの値を更新する時のみ電力を消費するように、バイアス電流を制御可能である。また、バッファも各動作クロックの立ち上がり時のみに動作するようにバイアス電流を制御できる。したがって、1) 繰り返し演算量は画素数に依存しない、2) 貫通電流パスおよび常通電流パスのない回路構成、の二点により、低消費電力化が期待できると考える。

5. む す び

反応拡散系のパターン生成の仕組みに基づいた画像復元LSIの実現を目指して、LSI化が容易な新しい反応拡散モデル、およびその基本アーキテクチャを提案した。YoungのLocal Activator-Inhibitorモデル[2]に連続フィールド関数を導入し、さらに状態変数を連続にした新モデルを提案した。数値計算により、モデルの基本パターンダイアグラムを作成した。それによって、二つのパラメータを制御することで、生成されるパターンの空間周波数、および形状(縞/斑点)を制御できることを明らかにした。さらに、上記のモデルを実装するLSIの基本回路を構成

した。アナログコンピューティングの手法を用いて、電位分布がLSI上のセルアレイを単位時間ごとに拡散する回路(拡散場)を設計した。また、モデルが必要とする二種類の拡散場を、一種類の拡散回路で疑似的に計算する事で、単位セル回路の面積を小さくした。回路シミュレーションにより、この回路が提案モデルと同等の動作をすることを確認した。また、指紋画像を例にとり、傷・ノイズのある縞画像が提案回路により滑らかに修復できることを示した。

現時点では、具体的なターゲットプロセスが決まっていないため、デバイスサイズ、動作クロック、消費電力に関する量的な見積もりが得られていないが、少なくとも仕組みの上で、DSPやマイクロプロセッサなどの逐次処理と比べて、消費電力は低いと考えられる。今後、TSMC 0.25- μm CMOSプロセスをターゲットとして、単位セルにフォトダイオードを組み込んだ、レイアウトを行う予定である。図5に示したレイアウトは暫定的なものであり、アクティブ領域のフィルファクターが極めて低い。そのため、センサを組み込んで、レイアウトの最適化を施すことで、現状と同じかそれ以下のサイズで単位セルを設計できる見込みがある。今後、レイアウトの最適化およびプロトタイプ試作を行い、評価を行う予定である。

謝辞 本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)平成12年度即効型産業技術研究事業費助成金、および同機構平成16年度産業技術研究事業費助成金を受けて実施したものです。

文 献

- [1] Markus M. and Hess B., Isotropic cellular automaton for modeling excitable media, *Nature*, vol. 347, no. 6288, pp. 56-58 (1990).
- [2] Young D.A., A local activator-inhibitor model of vertebrate skin patterns, *Math. Biosci.*, vol. 72, pp. 51-58 (1984).