

しま・斑点画像パターンの修復を行う反応拡散モデルとその LSI 化

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

A Reaction-Diffusion Model Performing Stripe- and Spot-Image Restoration and Its LSI Implementation

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

あらまし 本論文は、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しま・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 がしま（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

1. ま え が き

画像などのパターン修復処理は高度な演算を必要とするため、マイクロプロセッサや DSP の消費電力が高い。一方、生物はこれまで長い年月をかけて、体表パターンの生成や傷の修復など「形づくり」の処理を最小のエネルギーで行うよう最適化されてきた。本論文の目的は、そのような生物の形づくりの原理に基づいて、指紋や虹彩、体模様などに見られるしま・斑点などのパターンを自己修復する LSI の基本アーキテクチャを考案することにある。

指紋や虹彩のパターンは、個人を同定する有力な手掛りとなる。近年の指紋・虹彩パターン認識技術を用いたインテリジェントセキュリティシステムの発展は目覚ましく、汎用性の高い個人認証システム及びインタフェースが既に商品化されている。現在の認識システムの問題は、1) 登録後にできた傷や欠損パターンに対する認識率が低い、2) 高度な前処理と認識処理を行

うため、DSP 及びマイクロプロセッサの消費電力が高い、の 2 点である。前者は、パターンの傷や汚れを取り除く前処理を念入りに施すことで解決できるが、それは後者の問題を更に深刻にする。これらの問題が、今後特に需要があると見込まれるモバイル機器への認証システムの組込みを難しくしている。したがって、モバイル機器向けの現実的な認証システムを具現化するためには、この前処理の電力消費を低減しつつ、パターンの傷や欠損を補完する LSI が必要である。また、モバイル機器に組み込むためにはシステムの小型化も必要であり、そのためには、センサー体型の処理構造（インテリジェントセンサ化）が望ましい。そこで本論文では、生物の形づくり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ごと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。

本論文の構成は以下のとおりである。まず 2. において、基礎的な生物体表パターンの発生モデルを紹介する。その後、ハードウェア向けに改良した新しいモデルを提案する。3. にて、提案したモデルを実装するための並列アーキテクチャを示す。その動作シミュレーション及び今後の課題について 4. で述べる。

2. モ デ ル

生物の体の柄（斑点、豹柄、しま柄などの）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

[†] 北海道大学大学院情報科学研究科, 札幌市
Graduate School of Information Science and Technology,
Hokkaido University, Sapporo-shi, 060-0814 Japan

^{††} はこだて未来大学大学院システム情報科学研究科, 函館市
School of Systems Information Science, Future University -
Hakodate, Hakodate-shi, 041-8655 Japan

^{†††} はこだて未来大学システム情報科学部複雑系科学科, 函館市
Department of Complex Systems, Future University -
Hakodate, Hakodate-shi, 041-8655 Japan

a) E-mail: asai@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

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いう．物質やエネルギーの流れを伴う非平衡-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，特に斑点やしま柄などのパターンは Turing パターンと呼ばれる [1] ．

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・状態は連続値で表される．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 (CA) 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．

これまで反応拡散系を対象にしたいくつかの CA モデルが提案されており，それらのダイナミクスの単純化の度合は様々であるが，パターン形成に対する離散化の試みとしては，同じ枠組みで語られることが多い [2] ．連続系のダイナミクスを比較的忠実に離散化したモデルの一つに，Markus らによるもの [3] が挙げられ，複雑なルール構成となっている．これに対し，非常に単純化したモデルとして，Young によるものがある [4] ．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 2 物質（2 変数）で表される各セルの状態を，2 値 $\{1, 0\}$ の 1 変数でまとめ，更に 2 物質の拡散をも非常に単純化している．

Turing パターンを形成する条件の一つに，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，各セルの状態を $s(r, t)$ とおくと，状態 $s = 1$ であるセルからの効果を，距

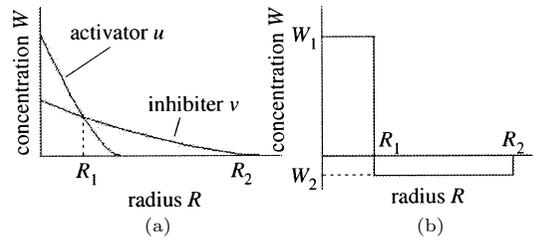


図 1 活性物質と抑制物質の拡散作用の概要．(a) 連続モデル；(b) 離散モデル

Fig.1 Diffusion of activators and inhibitors on (a) continuous model, (b) discrete model.

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 （抑制効果）とした [図 1(b)] ．そして，位置 r にあるセルの状態 s 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 $\sum_{|r-r_i| \leq R_2} W$ で決まるとした．もし総和が 0 であれば状態 s は変化しないが，正であれば次ステップ時に $s = 1$ に，負であれば $s = 0$ 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しま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点である．

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いえる．したがって 1) 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 2) 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欠ける．これらの点は，パターン形成ダイナミクスの縮約表現という数学的な目的に対しては問題とはならないが，実用目的に対しては問題となる．

我々は上記の拡散過程及び反応過程の問題点に対して，各々以下の変更

- 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）
- ステップ関数に代わるシグモイド関数の採用

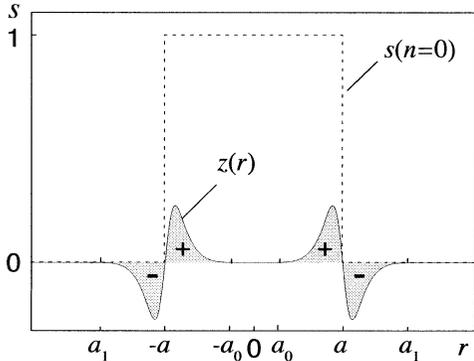


図 2 活性因子 u と抑制因子 v の拡散値の差 (z)
 Fig.2 Difference z between activators (u) and inhibitors (v).

を提案する．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，滑らかな斑点状若しくはしま状パターンを安定に形成する，LSI 化に適したモデルを提案する．

提案モデルでは，上記の問題点 1), 2) に対して，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，2 変数の拡散場により行う．つまり，活性物質及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)

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

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しきい値， β は関数の傾きを表す．このシグモイド関数の値が各セルの次の状態となる．以上を 1 サイクルとし，これを繰り返し計算する．

ここで簡単に， $|r| \leq a$ で状態 $s(n=0) = 1$ ， $|r| > a$ で $s(n=0) = 0$ となる一次元系の初期空間パターンを考える (図 2 の破線)．また，シグモイド関数のしきい値 c を 0 とする．すると，次ステップ時での空間

パターンは，初期パターンをもとにした 2 因子の拡散値差

$$z(r) = \int_{-a}^a G(r - r', D_u) - G(r - r', D_v) dr'$$

$$\left[G(x, y) \equiv \frac{1}{\sqrt{4\pi y \delta t}} \exp\left(\frac{-x^2}{4y \delta t}\right) \right]$$

の正負により決定される．図 2 中の実線は， δt 拡散後の 2 因子の拡散値差 $z(r)$ を示す．状態 $s(n=0) = 1$ の領域の両端では， z は図のように特徴的な形をとり， $r = \pm a$ から離れるに従って， z の値は 0 に漸近する．

以上の拡散過程を経て，次ステップ時には z が正の領域は $s(n=1) = 1$ に，負の領域は $s(n=1) = 0$ になる．したがって， z の値が正負明らかな領域 ($a_0 < |r| < a$ ， $a < |r| < a_1$) では，次ステップ時においてもそれぞれ $s(n=1) = 1$ ， $s(n=1) = 0$ となる．このことからパターン両端の z の正負領域のテイルがある程度重なっている場合，そのパターンは安定となる．言い換えれば， $s(n=0) = 1$ の領域の幅 (図 2 では $2a$) が $2(a - a_0)$ より小さければ，次ステップでも $|r| \leq a$ で状態 $s(n=1) = 1$ となり，安定となる．一方， $z(r)$ の値が 0 に漸近している領域では，シグモイド関数の性質により $s(n=1)$ の値は $\{1, 0\}$ の中間 (0.5) の値をとる．その結果， $s(n=1) = 0$ と 0.5 (または 1 と 0.5) の境で， z の値が正負明らかな領域が現れて，次ステップの更新時に新たな $s = 1$ の領域が発生する．その繰返しにより，しま模様が発生するのである．このことは，しま模様的一部分が欠損した入力を初期状態として与えた場合，そのしま模様の空間周波数とモデルが作り出すしま模様の周波数が一致する限り，上記の仕組みによって欠損部が補われることを意味している．初期パターンの幅が拡散 z の特徴的な幅に比べて小さい場合にも，拡散によって幅をもった正負明らかな領域が発生することにより，特定の周波数に収束する．

以上より，拡散係数に依存した特徴的な安定な周波数が存在し，その周波数に近い周波数パターンが初期状態として与えられた場合には，ある程度維持する形でパターンが平衡状態に近づく．

図 3 に， D_v/D_u 及び 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しま状，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

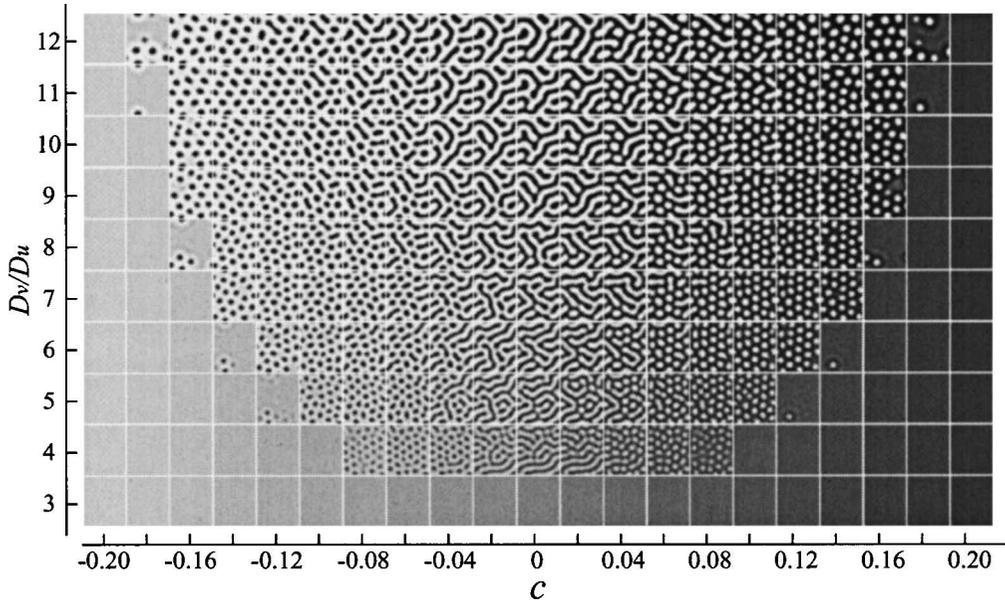


図 3 提案モデルのパターンダイアグラム
Fig. 3 Pattern diagram of proposed RD model.

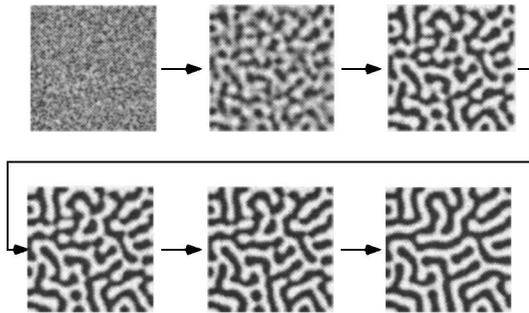


図 4 提案モデルにおけるしま模様の形成過程
Fig. 4 Snapshots of stripe-pattern formation.

数が変化する。つまり、1) 発生・修復したいパターンの形状（しま若しくは斑点）、及び 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。

図 4 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 サイクルでしま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しま模様で埋めつくしたものである。例えば指紋などのしま構造を与えると、グローバルなしま構造に反した傷や欠損などの局所パターンは、しま構造に置き換えられる（周り

の空間構造に従って修復される）。

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畳込み演算を、近接相互作用のみで表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、滑らかな斑点状若しくはしま状パターンを安定に形成する、LSI 化に適したモデルであるといえる。

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 CA 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、及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 2 点である。以下、3.1 では、二次元 CA 構造による拡散回路について説明する。また、3.1 の拡散回路を用いて、擬似的な 2 変数拡散回路を 3.2 にて構成する。更に、3.3 にて、しきい値を変更可能なシグモイド特性を有する差動アンプを提案する。

3.1 拡散回路の構成

前章の拡散方程式をアナログ的に実現する回路とし

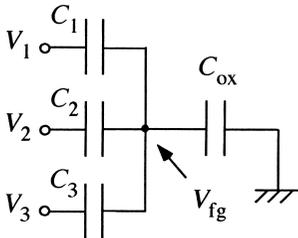


図5 基本 floating gate 構造
Fig. 5 Basic floating-gate structure.

て, floating gate (FG) MOS-FET を用いた拡散回路を提案する. 3 入力 FG の基本回路を図 5 に示す. 入力電圧を V_1, V_2, V_3 , FG の電位を V_{fg} とし, FG の初期電荷は零とする. ここで, C_{ox} が C_1, C_2, C_3 よりも十分に小さいとすると,

$$V_{fg} \approx \frac{C_1 V_1 + C_2 V_2 + C_3 V_3}{C_1 + C_2 + C_3}$$

となり, V_1, V_2, V_3 をそれぞれ C_1, C_2, C_3 で重み付けした電圧が FG に発生する. この回路を単位セルとして, 各セルにアナログメモリを加えて次元配列した構成を考える. ここで, $C_1 = kC, C_2 = C_3 = C$ とし, 自セルのメモリの値 V_i を V_1 , 最近傍セルのメモリの値 V_{i-1}, V_{i+1} をそれぞれ V_2, V_3 とすると,

$$V_{fg} = \frac{V_{i-1} + V_{i+1} + kV_i}{2 + k}$$

を得る. ここで, 時刻 t における各セルの V_{fg} の値 $[V_{i-1}(t), V_i(t), V_{i+1}(t)]$ をアナログメモリに記憶して, Δt 秒後のセルの $V_{fg} [= V_i(t + \Delta t)]$ が上式に従って更新されるとすると,

$$\frac{V_i(t + \Delta t) - V_i(t)}{\Delta t} = \frac{V_{i-1}(t) + V_{i+1}(t) - 2V_i(t)}{(2 + k)\Delta t}$$

を得る. これは, 時間と空間が離散化された拡散方程式そのものである. つまり, 各セルの V_{fg} をアナログメモリに格納し, 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れる. また, 空間の離散ステップを Δx とすれば, その拡散係数は $\Delta x^2 / [\Delta t(2 + k)]$ であり, これは容量比 k と時間ステップにより制御できる.

この仕組みをもとに, 電圧が二次元空間を拡散する回路を構成した. その単位セル回路を図 6 に示す. 時刻 t における自セルの 4 近傍セルのメモリの値を V_n, V_w, V_s, V_e , 自セルのメモリの値を V_c とし, ボルテージフォロア VF1 の入力容量 C_{ox} が制御ゲートの

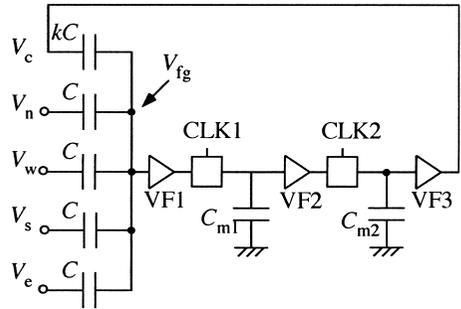


図6 floating gate を用いた拡散回路
Fig. 6 Floating-gate diffusion circuit.

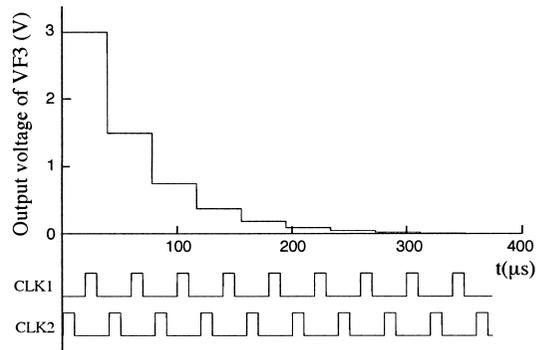


図7 floating gate 拡散回路のシミュレーション
Fig. 7 Simulation results of diffusion circuit.

容量 C よりも十分に小さいとする. 上記と同様に, 次ステップの FG の電位を $V_{fg} = V(t + \Delta t)$, $V(t) = V_c$ としてメモリの値を逐次更新する. 図 6 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 によりマスタとスレーブの動作を制御). すると, セル回路のダイナミクスは

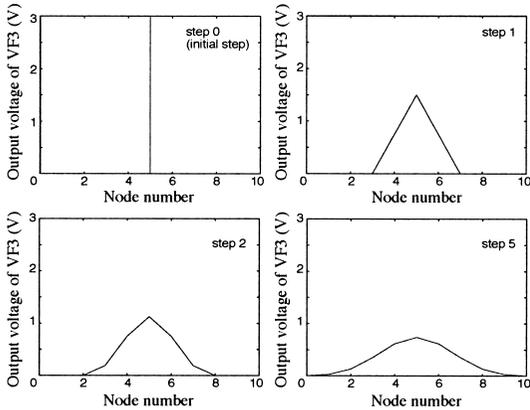
$$\frac{V(t + \Delta t) - V(t)}{\Delta t} = \frac{V_n + V_w + V_s + V_e - 4V(t)}{(4 + k)\Delta t}$$

となり, これは拡散方程式

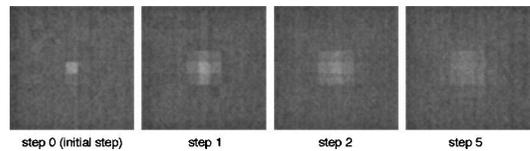
$$\partial V(\mathbf{r}, t) / \partial t = D \nabla^2 V(\mathbf{r}, t)$$

を正方グリッド上 ($\Delta x = \Delta y$) で離散化したものと等価である. なお, 拡散係数は $\Delta x^2 / [\Delta t(4 + k)]$ となる.

図 7 に上記のセル単体の動作シミュレーション結果を示す ($k = 4, C = C_{m1} = C_{m2} = 100$ fF, $C_{ox} = 1$ fF. 理想ボルテージフォロア, トランスファークゲートを使用). 4 近傍からの入力は零 (V_n, V_w, V_s, V_e をすべて接地) とし, 主メモリ C_{m2} に初期電圧と



(a) Simulation results of one-dimensional diffusion circuit



(b) Simulation results of two-dimensional diffusion circuit

図 8 拡散回路のシミュレーション. (a) 一次元; (b) 二次元

Fig. 8 Simulation results of 1-D (a) and 2-D (b) diffusion circuits.

して 3V を与えたときのメモリの値の時間変化を調べた. 4 近傍からの入力为零の場合, 上記の離散拡散方程式は, 時間の経過とともに V が指数関数的に減衰する解をもつ. $\Delta t \rightarrow 0$ において, 回路の $V(t)$ が指数関数的に減衰することを確認した. また, セルを空間配置して, 一次元・二次元空間上の拡散シミュレーションも併せて行った. インパルス入力 (時刻 0 で中心のセルの主メモリに 3V を与える) に対するセル状態のスナップショットを図 8 に示す. 図 8 (a) は拡散回路 ($k = 2$) を 11 個, (b) は拡散回路 ($k = 4$) を 11×11 個配置したものの結果である. 時間ステップの経過とともに, 電圧が空間を拡散していく様子が確認できる.

3.2 擬似二層拡散回路

前章の提案モデルは, 動作サイクルごとに 2 種類の拡散場 (u, v ; 拡散係数はそれぞれ D_u, D_v) に同じ初期入力を与え, δt 秒後の $u - v$ を計算する. しかし, 2 種類の拡散場を実現するために上記の FG デバイスを二つのセルに組み込むことは, 集積度の面で好ましくない. そこで, 1 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

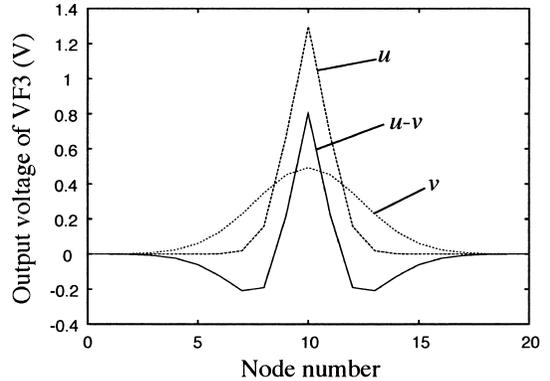


図 9 擬似 2 変数拡散回路のシミュレーション

Fig. 9 Simulation results of pseudo two-layer diffusion circuit.

$$u(t, x) = \frac{1}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

をもち, t と D が互いに可換である. したがって, $D_v/D_u \equiv \Delta t_0/\Delta t_1$ 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, 更に $\Delta t_1 - \Delta t_0$ 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 (回路) 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. 図 9 にその動作シミュレーション例を示す. ここで, 拡散回路の FG 容量比 $k = 3, D = 1, \Delta t_0 = 1, \Delta t_1 = 6$ とした. ここで, D は D_u を表す. また, $\Delta x = 1$ のとき, $D = 1/[\Delta t(2+k)]$ より, $\Delta t = 1/5$ となる. 図 9 は, インパルス入力を 5 ステップ拡散 ($D_u = 1$ で $\delta t = 1$ だけ拡散) させた VF3 の電圧 ($= u$), 更にそこから 25 ステップ拡散 ($D_v = 6$ で $\delta t = 1$ だけ拡散) させた電圧 ($= v$), 及びそれらの差 ($u - v$) をプロットしたものである.

3.3 可変しきい値シグモイド応答回路

前節にて得られた拡散後の u と v は, セル内の一時メモリ及び主メモリに電圧として格納する. 提案モデルの次の動作は, $u - v$ からオフセット c を除いた値をシグモイド関数に与え, その出力を次サイクルの初期値にセットする. これを実現するために, 可変しきい値 (オフセット) シグモイド応答回路を構成した. その回路構造を図 10 に示す. この回路は, 一般的なワイドレンジ増幅器 [5] の入力部に FG 構造を適用し

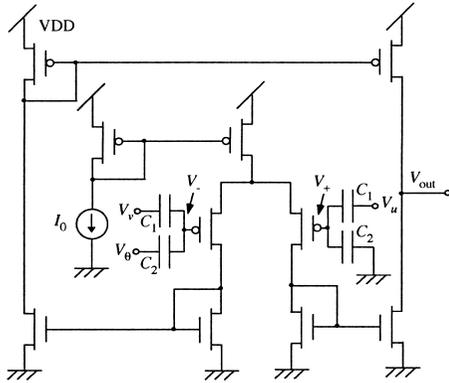


図 10 可変しきい値シグモイド応答回路

Fig. 10 Variable-threshold sigmoidal response circuit.

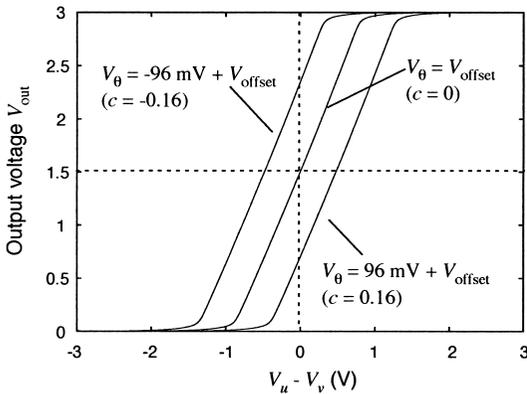


図 11 可変しきい値シグモイド応答回路の静特性

Fig. 11 DC characteristics of variable-threshold sigmoidal response circuit.

たものである．FG の電圧 (V_+ , V_-) を入力電圧として，回路の入出力特性を

$$V_{out} = F(V_+ - V_-)$$

で表す．この $F(\cdot)$ は厳密にはシグモイド関数ではないが，これを $f(\cdot)$ とみなせば，FG 構造により

$$V_{out} = VDD \cdot f\left(\frac{C_1(u - v) - C_2c_0}{C_1 + C_2}\right)$$

を得る (VDD は電源電圧を表す)．したがって， $u \equiv V_+/VDD$, $v \equiv V_-/VDD$, $c_0 \equiv V_\theta/VDD$, $\beta \equiv C_1/(C_1 + C_2)$, $c \equiv C_2c_0/C_1$ なる正規化により，この回路は提案モデルの応答関数に対応する．図 11 に，この回路の入出力特性を示す (MOSIS AMIS 1.5- μm CMOS プロセスパラメータ，最小サイズ MOS FET を使用)．FG の容量は $C_1 = 20 \text{ fF}$,

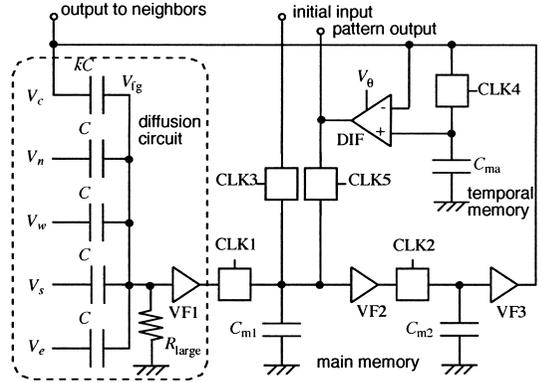


図 12 単位セルの回路構成

Fig. 12 Construction of unit cell circuit.

$C_2 = 100 \text{ fF}$, $I_0 = 100 \text{ nA}$ ，オフセット電圧は $V_\theta = -96 \text{ mV} + V_{offset}$, V_{offset} , $96 \text{ mV} + V_{offset}$ とした．ここで， V_{offset} は，増幅器固有のオフセット電圧であり，シミュレーションで使用した MOS FET では， V_{offset} は 60 mV であった．

提案回路では， V_u と V_v が β 倍されて FG に与えられるため，差動増幅器の入力電圧 (V_+ , V_-) は非常に小さくなる．そこで，一般的な n 型差動アンプの代わりに p 型差動アンプを用いた．また，入出力特性を対称にするため，ワイドレンジ構成をとった．

前節までに述べた拡散回路及び差動アンプは FG を用いているため，製造工程若しくは回路を動作させることによって FG 部に予測できない電荷が蓄積される．この電荷アンプのオフセットに影響を与えるため，放電する必要がある．そのために，FG 部に quasi-floating-gate (QFG) 構造 [6] を用いる．具体的には，FG とグラウンドの間に高抵抗を付加し，擬似的にトランジスタのゲートをフローティングにする．この高抵抗を通して，電荷が放電される．ただし，FG の入力容量と高抵抗は非常に低いコーナー周波数をもつ高域フィルタとして動作するため，入力信号の周波数をこのコーナー周波数より十分に高くする必要がある．ゲートに接続する高抵抗は，ダイオード接続 pMOS FET を直列に接続することで実現できる．この構成は MOS FET の OFF 抵抗を利用しているため，非常に高い抵抗値を実現できる．本提案回路では，すべての FG において QFG 構造を用いる．

上記の回路をすべて組み込んだ単位セル回路を図 12 に示す．ここで，DIF は上記の可変しきい値シグモイド応答回路を表す．基本構成と拡散動作は図 6 の回

路と同じである。CLK3 は初期パターン入力の制御クロックで、単位セルごと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。C_{ma} は拡散用の一時メモリで、CLK4 によって制御する。可変しきい値シグモイド応答回路の出力は CLK5 で次ステップの初期値として C_{m1} に取り込む。

4. シミュレーション結果

前章で提案したセル回路を 200 × 200 個配置した回路を想定し、動作確認を行った。SPICE を用いて得られた結果 (図 7~図 11 の) をもとに回路方程式を立て、その微分方程式を数値的に解くことによってシミュレーションを行った (SPICE を利用すると計算に膨大な時間がかかるため)。このシミュレーションでは、 $D_u = 1, D_v = 10, \delta t = 1$ (s) における提案モデルの動作を再現することを目的とした。回路路上では、 $D_u = 1/[\Delta t(4+k)]$ より ($k = 4$)、 $\Delta t = 1/8$ となる。つまり、8 ステップ拡散回路を動作させ、その値を一時メモリ (C_{ma}) に保存し、更に 72 ステップ拡散回路を動作させる。以上を 1 サイクルとして、これを繰り返し計算した (1 ステップの実行には 2 clock 必要)。

図 13 に、初期パターンとして 0 から VDD のランダム電圧を入力した場合のパターン形成過程を示す。図の濃淡はセル回路の DIF の電圧を表す (白:VDD, 黒:0V)。オフセット値は、 $c = 0, 0.16$ とした (DIF のオフセット電圧は、それぞれ $V_{offset}, 96 \text{ mV} + V_{offset}$)。図 3 から予想できるように、(a) ではしま模様だが、(b) では斑点状のパターンが得られた。図 13 (a), (b) とともに 150 サイクル (24,000 clock) 程度で定常パター

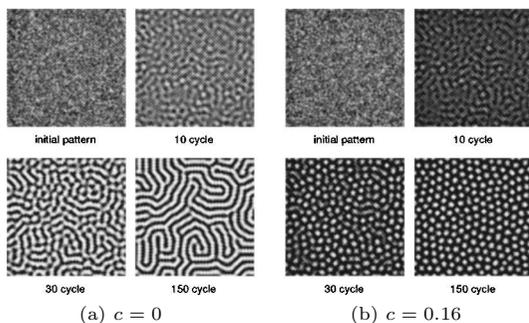


図 13 ランダム画像に対する出力パターン

Fig. 13 Snapshots of pattern formation for random image.

ンが得られた。

これらのパターンは、しま・斑点などのグローバルパターンとは異なる局所パターンが周囲の構造に従って修復されることにより、形成される。したがって、しま模様や等間隔の斑点からなる画像の修復に適しているといえる。画像修復の例として指紋画像を与えたときのパターン形成過程を図 14 に示す。図 14 (a) は、 $c = 0$ の場合のパターン形成過程であり、グローバルパターンに反するノイズや傷などの局所パターンが、周囲の構造に従って修正されることを確認した。パターンが安定するまでには 80 サイクル (12,800 clock) を要した。この画像の例では、初期状態で既にある程度の形が完成しているため、ランダム画像と比べて少な

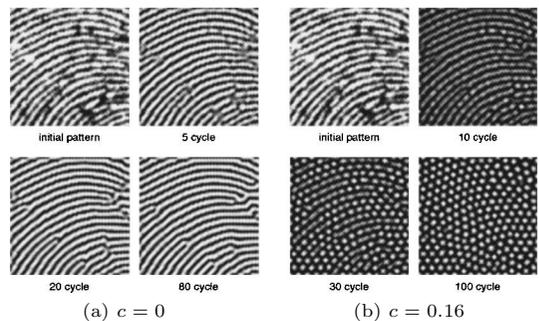


図 14 指紋画像に対する出力パターン

Fig. 14 Snapshots of pattern formation for fingerprint image.

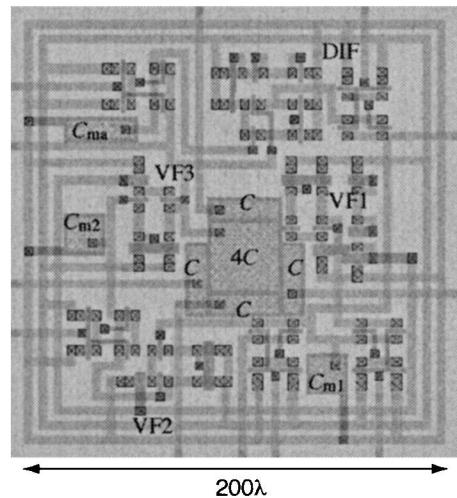


図 15 単位セルのレイアウトパターン ($c = 0$ で固定、指紋画像の復元に特化したレイアウト)

Fig. 15 Layout pattern of unit cell with fixed $c (= 0)$ for fingerprint restoration.

いサイクル数で定常パターンが得られる．図 14 (b) は $c = 0.16$ の場合であり，指紋画像の構造を反映した斑点状のパターンが得られた．パターンが安定するまでに 100 サイクル (16,000 clock) を要した．

提案回路を，MOSIS AMIS 1.5- μm n-well double-poly double-metal CMOS process ルールを用いて設計した．そのレイアウトパターンを図 15 に示す (λ はスケールパラメータを表す)．このレイアウトは，指紋画像の修復に特化したもので，オフセットパラメータは変更不可である ($c = 0$ に固定)．それによって，通常のワイドレンジ増幅器で DIF を代用可能となり，セル回路の面積が小さくなる．

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，及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 [4] に連続フィールド関数を導入し，更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，及び形状 (しま/斑点) を制御できることを明らかにした．更に，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 上のセルアレー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 2 種類の拡散場を，1 種類の拡散回路で擬似的に計算することで，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・ノイズのあるしま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．

今後の課題として，試作チップの消費電力の評価が挙げられる．提案回路では，1 セル当り 4 個の差動増幅器を使用している．それらのソース電流を 100 nA とし 3 V 電源で動作させると，消費電力は $1.2 \mu\text{W}/\text{セル}$ である．実際の指紋認証に利用する場合， 400×400 程度のセル (画素) が必要である．この場合，回路全体の消費電力は 200 mW となる．この消費電力は，差動増幅器をメモリ更新時にのみ動作させることで，大幅に低減できる．シミュレーションでは，指紋画像を入力した場合，パターンが安定するまでに 80 サイ

クル (12,800 clock) を要したことから，回路を 1 MHz で動作させれば，13 ms 程度で指紋を修復できる．ここで，メモリ更新にかかる時間を例えば 1 ns とし，その時間だけ差動増幅器にソース電流を供給するように制御すれば，理想的には，回路の消費電力は 3 けた小さくなる ($\sim 200 \mu\text{W}$)．この制御の最適化によって，モバイル機器向けの現実的な認証システムを具現化できると考える．

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 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] G. Nicolis and I. Prigogine, *Self-organization in Nonequilibrium Systems — From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*, John Wiley & Sons, New York, NY, 1977.
- [2] Y. Oono and S. Puri, “Study of phase-separation dynamics by use of cell dynamical systems. I. Modeling,” *Phys. Rev. A*, vol.38, no.1, pp.434–453, 1988.
- [3] M. Markus and B. Hess, “Isotropic cellular automaton for modeling excitable media,” *Nature*, vol.347, no.6288, pp.56–58, 1990.
- [4] D.A. Young, “A local activator-inhibitor model of vertebrate skin patterns,” *Math. Biosci.*, vol.72, pp.51–58, 1984.
- [5] C. Mead, *Analog VLSI and neural systems*, Addison Wesley, New York, 1989.
- [6] J. Ramirez-Angulo, C.A. Urquidi, R. Gonzalez-Carvajal, A. Torralba, and A. Lopez-Martin, “A new family of very low-voltage analog circuit based on quasi-floating-gate transistors,” *IEEE Trans. Circuits Syst. II, Analog Digit. Signal Process.*, vol.50, no.5, pp.214–220, 2003.

(平成 17 年 3 月 1 日受付，6 月 10 日再受付，
7 月 25 日最終原稿受付)



鈴木 洋平

平 16 北大・工・電子卒．現在，同大大学院情報科学研究科修士課程に在学中．セルオートマトン LSI に関する研究に従事．



高山 貴裕

平 16 はこだて未来大・システム情報科学・複雑系科学卒。現在、同大大学院博士前期課程在学中。人工知能領域、特に、ネットワークにおける、マルチエージェントフレームワークについての研究に従事。



元池 N.育子

平 8 名大・理・物理卒，平 10 同大大学院人情博士前期課程了，平 13 京大理学博士後期課程了。平 14 公立はこだて未来大・システム情報・複雑系助手。反応拡散系を用いた信号処理等の研究・教育に従事。



浅井 哲也（正員）

平 5 東海大・工・電子卒，平 8 同大大学院工学研究科修士課程了，平 11 豊橋技大博士課程了。同年，北大大学院工学研究科助手。平 13 同研究科助教授。新概念 LSI システムに関する研究に従事。工博，IEEE，日本神経回路学会，応用物理学会各会員。