

## 非線形アナログ集積回路と反応拡散チップ —指紋画像修復を行うインテリジェント視覚センサー—

浅井 哲也 雨宮 好仁

北海道大学工学部電子工学科 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目

E-mail: {asai, amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

**あらまし** 生体の体模様の発生モデルをアナログ集積回路化し、それを光センサと一体化して高速に指紋画像修復を行うインテリジェント視覚センサについて報告する。このアナログ集積回路（反応拡散チップ）は、化学反応を模する反応回路と分子拡散を模する拡散デバイスの簡単な組み合わせにより、非一様な散逸構造を自発的に形成する性質を持つ。この性質を利用すると、欠損のある指紋画像をパターンの種として与えたとき、周囲の構造の特徴を保ちながら最適なパターン（欠損・ノイズのない指紋画像）が自己生成される。本稿では「非一様な縞状パターンおよび指紋パターンの復元」を例として、反応拡散チップのパターン生成・復元能力について報告する。

**キーワード** 集積回路, インテリジェントセンサ, 非線形アナログ回路, 反応拡散系

## A Nonlinear Analog VLSI and the Reaction-Diffusion Chip —Intelligent Image Sensors for Fingerprint Image Restoration—

Tetsuya ASAI and Yoshihito AMEMIYA

Department of Electrical Engineering, Hokkaido University  
Kita 13, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-8628, Japan

E-mail: {asai, amemiya}@sapiens-ei.eng.hokudai.ac.jp

**Abstract** We propose analog CMOS circuits that implement Wilson-Cowan (WC) oscillators. The WC circuits collectively produce various dissipative patterns (e.g., Turing patterns and spiral ones) on the chip. The chip consists of i) reaction circuits that emulate elementary interactions between neurons (or chemical substances) and ii) diffusion devices that imitate synapses (or chemical diffusion of the substances). Utilizing the dissipative properties of the chip, we developed novel image-processing systems. In this report, we show that the chip produces a stable fingerprint pattern without noises and unnatural discontinuities of wrinkles, when a real fingerprint image was given to the chip as initial states. These results imply future potentialities of RD chips in engineering applications.

**Keyword** Integrated Circuits, Intelligent Sensors, Nonlinear Analog Circuits, Reaction Diffusion Systems

# 1 はじめに

指紋は個人を同定する有力な手がかりの一つである。指紋を用いたセキュリティシステムの近年の発展は目覚ましく、安全かつ汎用性のある「IDカードのいらぬ」個人認証・同定システムおよびインターフェースの実現が期待されている。現在の指紋認識システムの問題点の一つは、登録後にできた指紋の傷や欠損パターンに対する認識率の低さである。そのため、(光センサなどから)取得した指紋パターンの傷や汚れなどを取り除く前処理が必要不可欠であるが、認識率を上げるために前処理を念入りに行くと、照合にかかる時間が著しく増加してしまう。現実的な指紋認識システムを具現化するためには、この前処理段階で指紋の傷や欠損を高速に補完する必要がある。そこで本研究は、生体の体模様の発生機構になった前処理(反応拡散系による指紋パターンの欠損修復)の仕組みをアナログ回路化し、それを光センサと一体化して高速に指紋画像修復を行うインテリジェントセンサの開発を目的とした。本稿ではその開発の現状について報告する。

## 2 指紋パターンの欠損修復と反応拡散チップ

反応拡散系を応用して画像処理(パターン修復)をすることに注目しよう。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[1]。生物の体模様(シマウマの縞模様など)を創り出す系もその範疇にあり、反応拡散方程式を用いてモデル化できる。この体模様の発生過程を応用すれば、(生物の傷が自然治するように)パターンの修復ができそうである。例えば、指紋のような縞構造を持つパターンは反応拡散系が創り出す典型的な空間パターンであり、この系にパターンの種(欠損のある指紋画像)を与えると、周囲の構造の特徴を保ちながら最適なパターン(欠損・ノイズのない指紋画像)が自己生成される[2], [3]。この演算は、多数の化学物質が同時並列に反応・空間拡散することによって物理的に行われるものであり、通常のデジタル演算方式とは根本的に異なる。

上記のような系をデジタルコンピュータ(ソフトウェア)でシミュレートすることは容易ではない(計算に膨大な時間がかかる)。そのため、指紋修復のような速度が要求されるアプリケーション分野にお

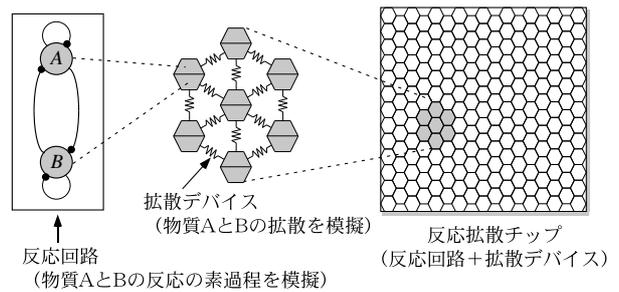


図 1: 反応拡散チップの内部構成

いては、化学反応と拡散の媒体を直接エミュレートして高速動作するようなカスタムハードウェア(チップ)が必要不可欠である。これは、反応拡散方程式を逐次的に解く(シミュレートする)デジタルプロセッサ的なものではなく、たとえば、ペローゾフ・ジャボチンスキー反応[1]と同様な散逸構造(エネルギーを消費しつつ生まれる時空間パターン)がチップ表面の電位分布として観測できるようなものと考えてよい。このチップを反応拡散チップと呼ぶ[2]。

反応拡散チップの構成要素は、化学反応の素過程を模擬する「反応回路」と化学物質の拡散を模擬する「拡散デバイス」である。図1に反応拡散チップの構成例を示す。図では二種類の化学物質(AとB)の自己・相互作用(反応)と拡散を模式的に表してある。反応回路を格子状に敷き詰め、それらの間を拡散デバイスで相互結合して反応拡散チップを構成する。通常のデジタルプロセッサとは異なり、個々の反応回路と拡散デバイスが並列に動作して時空間パターンを創り出す。反応回路と拡散デバイスの非線形性に応じて、様々な種類の反応拡散チップを構成することができる。

反応拡散チップの各々の反応回路に半導体センサを搭載することで、反応拡散原理にもとづいて情報処理を行う機能センサが構成可能である。このような機能センサをインテリジェントセンサと呼ぶ。次章にて、反応回路に光センサを搭載して指紋画像修復を行うインテリジェント視覚センサの構成について説明する。

## 3 指紋修復センサの構成

Wilson-Cowan 振動子と呼ばれる神経モデル(シグモイド伝達特性を持つ興奮性と抑制性の神経細胞のカップリングモデル[4])を反応回路として用いる。

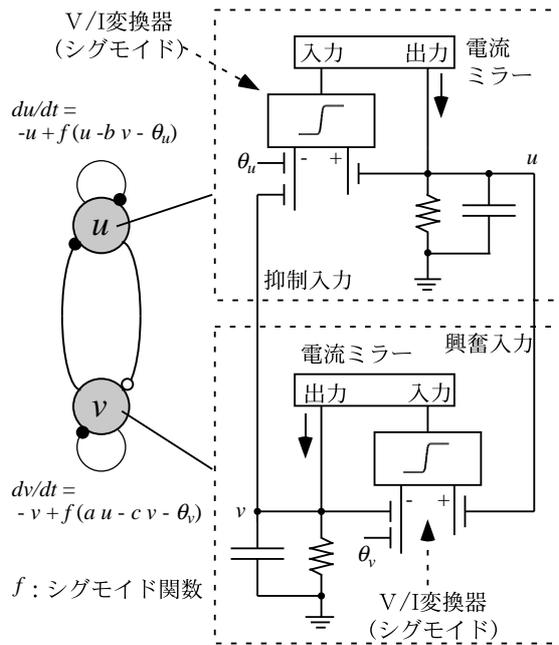


図 2: Wilson-Cowan 反応回路の構成

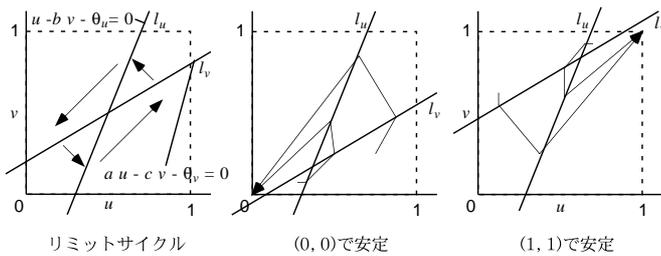


図 3: Wilson-Cowan 反応回路の安定性

神経細胞間の相互作用を二物質の化学反応に対応させ、膜電位の時間変化をヌルラインの近傍で線形近似すると、その方程式はチューリングのパターン発生モデル [1] と同形になる。空間の周期解を仮定して空間周波数に関する安定性を計算すると、パラメータにより決まる特定の空間周波数が不安定化する。この仕組みが、安定な（一定空間周波数の）縞分布をつくりだす。

Wilson-Cowan 振動子を実装した反応回路の構成を図 2 に示す。以下、この回路を Wilson-Cowan 反応回路と呼ぶ。Wilson-Cowan 反応回路は、興奮性と抑制性の神経細胞回路（それぞれ図 2 上段と下段）を組み合わせる構成する。回路中の V/I 変換器（シグモイド伝達特性）は、差動対回路（二つの nMOS トランジスタ）を表す。V/I 変換器は興奮（+）および抑制（-）入力を持つシナプスの役割を果たし、

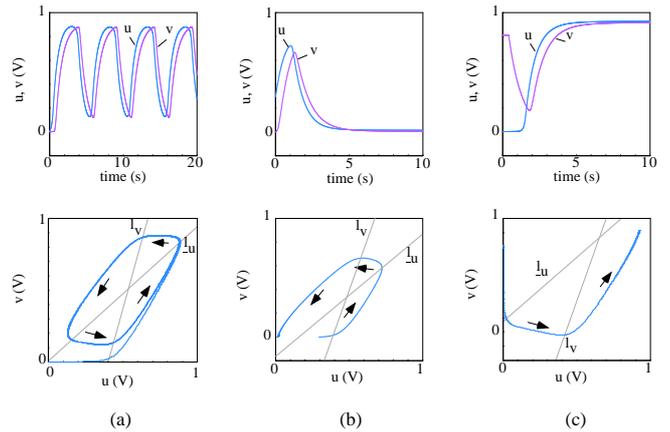


図 4: Wilson-Cowan 反応回路の測定結果.

外部から興奮性（ $u$ ）と抑制性入力（ $v, \theta_u, \theta_v$ ）を受ける（図 2 左に結合の模式図を示す）。

Wilson-Cowan 反応回路は、外部からの制御入力（ $\theta_u, \theta_v$ ）に応じてリミットサイクル解と定常解（入力に応じて二つの固定点を持つ）が切り替わる性質を持つ。図 3 に、パラメータ直線  $l_v$  の位置（ $\theta_v$  の値）により安定性が変化の様子を示す。Wilson-Cowan 反応回路を拡散結合して、回路の安定性（ $\theta_u, \theta_v$  の値）が周囲の状態（ $u, v$ ）に応じて変化するような系を構成する。この状態で、 $v$  の拡散定数を  $u$  のそれよりも大きくすると、定常状態において、 $u$  と  $v$  に一定空間周波数の縞分布が形成される [2]。

## 4 実験結果

Wilson-Cowan 反応回路を試作し、SPICE シミュレーションと併せて評価を行った（MOSIS AMIS 1.5- $\mu\text{m}$  CMOS プロセスを利用）。

単体の Wilson-Cowan 反応回路の動作結果を図 4 に示す（回路中の C と R は外付け）。回路の時定数は 1 (s) に設定した。図 3 に示した安定性の予測のとおり、制御電圧  $\theta_v$  に応じて、リミットサイクル解 [図 4(a)] と二つの異なる定常解 [図 4(b), (c)] が表れることを確認した。シミュレーション上では時定数が  $O(10^{-6})$  (s) 以上であれば、図 3 に示した予測のとおり動作することを確認した。

次いで、100 個の Wilson-Cowan 反応回路を一次元結合した回路（反応拡散回路）を構成し、その動作を確認した（図 5）。初期パターンとして図 5(a) のような欠損のある縞模様を与えると、図 5(b) のよ

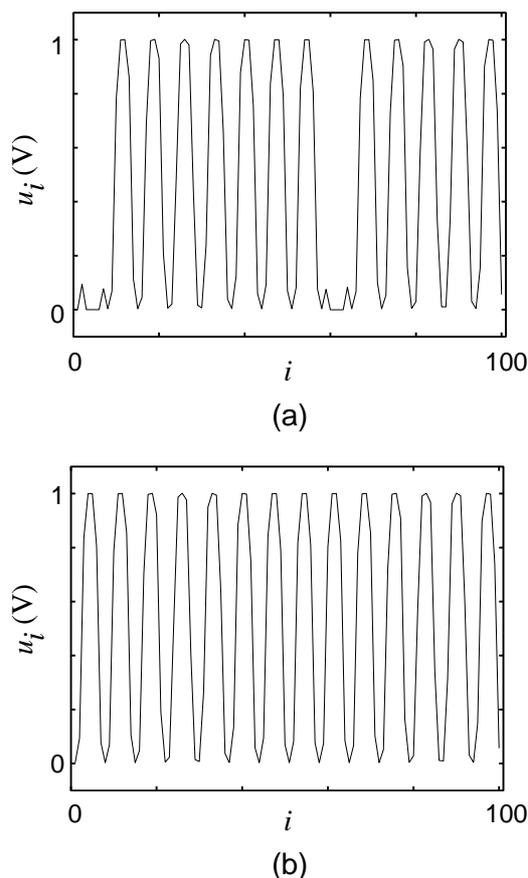


図 5: 一次元反応拡散回路による縞の欠損修復

うな定常解が得られ、欠損部分が完全に修復されることを確認した。

最後に、Wilson-Cowan 反応回路を二次元結合させた反応拡散回路のシミュレーション結果を示す。パラメータは、初期ランダムパターンから縞状パターン（平均空間周波数を  $f$  で定義）が発生するような値を与えた。平均空間周波数が  $f$  と同程度の縞状パターン（参照パターン）を初期パターンとして反応拡散回路に与えると、当然ながら同じパターンが得られた。また、参照パターンに空間周波数が  $f$  以下のノイズ（傷）をのせたパターンを初期パターンとして用いても、得られたパターンは参照パターンと同じものであった（図 6）。この結果は、パターンに与えたノイズ（傷）が反応拡散回路のパターン生成能力によって除去（傷に対しては修復）されることを示している。また、同様の試みを指紋パターンに対して行い、初期画像のノイズ部分（黒い塊）が除去され、さらに指紋の細線部・欠損部を復元できることを確認した（図 7）。

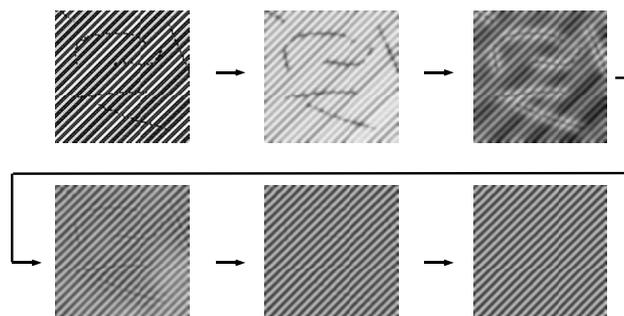


図 6: 傷の修復動作.

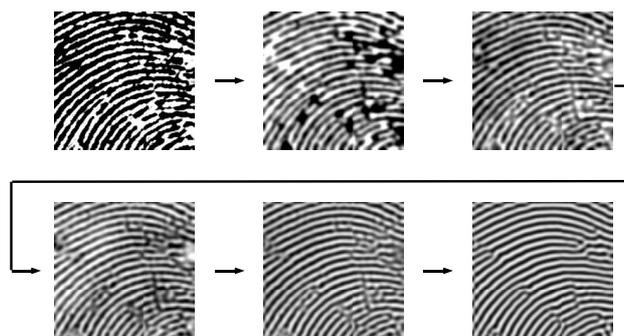


図 7: 指紋画像の修復動作.

## 5 おわりに

本稿で示したインテリジェント視覚センサの構成はセルオートマトンやニューラルネットなどの構成に極めて近く、チップの単位素子（反応回路・拡散デバイス）が並列に動作して複雑な時空間構造を作り出す。この時空間構造は、チップ上の反応回路・拡散デバイスが電気エネルギーを消費しながら作り出した散逸構造であり、このチップ自身が実在の反応拡散系だと言える。今後、その工学的応用可能性をさらに追及していくことが重要であると考えられる。

## References

- [1] 三池, 森, 山口 著, 非平衡系の化学 III: 反応・拡散系のダイナミクス, 講談社, 1997.
- [2] 浅井 哲也, 反応拡散チップの開発～反応拡散系をシリコン LSI の上に実現する～, 電気学会誌, Vol. 121, No. 4, pp. 253-257, 2001.
- [3] 藤田 他, ”指紋画像処理のためのデジタル反応拡散システムの設計,” 電子情報通信学会-技術研究報告, NLP98-79, pp. 9-16, 1998.
- [4] H.R. Wilson and J.D. Cowan, Excitatory and inhibitory interactions in localized populations of model neurons, *Biophys. J.*, Vol. 12, pp. 1-24, 1972.