

チューリングモデルの回路化

Analog CMOS Circuits Implementing Turing's Reaction-Diffusion Model

西宮 優作 浅井 哲也 雨宮 好仁
 NISHIMIYA Yusaku, ASAI Tetsuya, AMEMIYA Yoshihito
 北海道大学 工学部
 Department of Electrical Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

反応拡散系の時空間パターン生成機能を利用して新しい情報処理デバイスを開拓したい。ここでは反応拡散モデルの一種、チューリングモデルを模擬するアナログ電子回路を提案し、その動作をシミュレーションで示す。この回路はパターン欠損修復などの画像処理に応用することができる。

2. チューリングモデルによる空間パターンの生成

チューリングモデルとは「二つの物質が互いに相手の生成を制御しながら拡散するとき、適切な条件下では物質濃度の非一様パターンを生じる」というものである。生物の形態形成を物理的に説明するために提案された。二つの物質をそれぞれ活性物質（濃度 u ）および抑制物質（濃度 v ）として、チューリングモデルは図 1(a) のような反応拡散方程式で表される。パラメータの値によって物質濃度分布は種々のパターン形状をとる（図 2）。この性質を画像の欠損修復や強調処理に使うことが提案されている（文献）。

3. CMOS による回路構成

いま反応項が図 1(b) のように線形であるとして、反応キネティクスを模擬するために図 3 のセル回路を考えた。四つの差動対によって反応項に対応する電流をつくり、その電流でキャパシタ C を充放電する。各差動対の伝達コンダクタンス比を $a:b:c:d$ に設定する。そのため差動対の電流比を $a^2:b^2:c^2:d^2$ とする。差動対の入出力電圧 u, v が物質濃度に対応する。（なお u, v の振幅が大きくなると差動対の特性が飽和して線形反応からずれる。）

多数のセル回路を抵抗で結合して拡散の効果を模擬する。たとえば図 4 のように周期的境界条件を導入して一次元結合構造をつくる。抵抗のコンダクタンス値が図 1(a) の拡散係数 D_u, D_v に対応する。

4. 回路動作シミュレーション

図 4 の一次元結合系について動作を調べた。この系で得られる一次元パターンの空間周波数は D_u, D_v の値（したがって抵抗の値）に依存する。この系に微小な濃度擾乱（図 5(a)）を初期値として与えると、空間的な周期パターンが生成される（図 5(b)(c)）。抵抗値に応じてパターンの空間周波数を制御できる。次に、図 6(a) のように微弱かつ欠損のある入力パターンを初期値として系の動作をみた。抵抗値を適切に設定すれば、図 6(b) のように強調・修復されたパターンを生成することができる。

（文献）藤田 渉・青木 孝文・樋口 龍雄 「デジタル反応拡散システムとその応用」 信学技報 NLP98-37(1998)

$$\begin{aligned} \frac{u}{t} &= \overbrace{f(u, v)}^{\text{反応項}} + \overbrace{D_u}^{\text{拡散項}} \nabla^2 u \\ \frac{v}{t} &= \overbrace{g(u, v)}^{\text{反応項}} + \overbrace{D_v}^{\text{拡散項}} \nabla^2 v \end{aligned} \quad \begin{cases} f(u, v) = au - bv \\ g(u, v) = cu - dv \end{cases}$$

(a) 反応拡散方程式 (b) 線形の反応項
 図 1 活性物質 u と抑制物質 v の相互作用

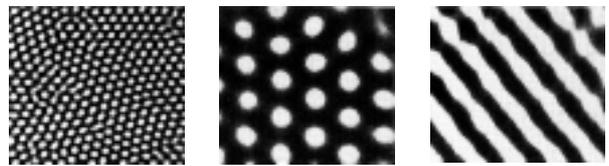


図 2 二次元チューリングモデルの空間パターン例

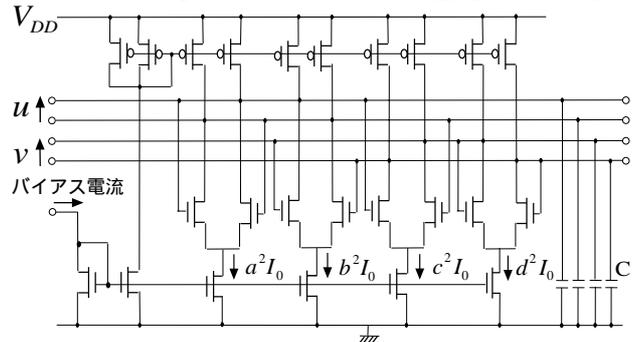


図 3 反応キネティクスを発生するセル回路

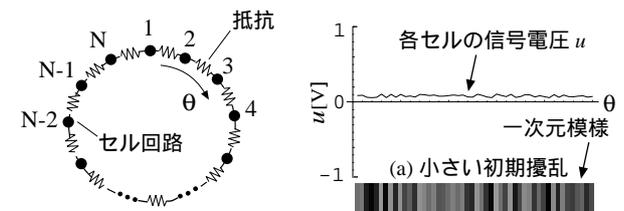


図 4 一次元の結合構造

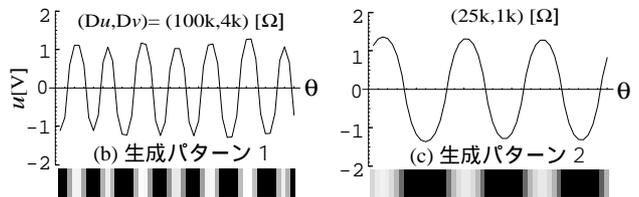


図 5 空間パターンの生成と周波数制御（セル数 $N=50$ ）

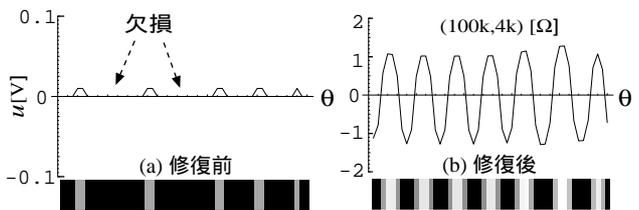


図 6 空間パターン欠損の修復（セル数 $N=50$ ）