

興奮場の特質を用いた情報処理演算

名古屋大学大学院 人間情報学研究科 元池育子

1 はじめに

神経系での並列処理の基本原則を説明しようと、これまでにモデル系での研究が数多くなされてきた。しかしながら、その多くは個々のニューロンの動的な興奮特性を無視したものであった。

ところが、実際の神経細胞は決して静的なものではない。従って神経系のどの部分を本質としてモデル化するかによって、ネットワークが本来有しているはずの機能が損なわれてしまっていた可能性がある。そこで我々は、現在のニューロンモデルでは説明できないような、時間演算を陽に含んだ情報処理モデルの構築を目指し、神経細胞の動的な興奮特性と実空間上の広がりに着目した。言い換えると、細胞のイメージを残したままニューロンを興奮「場」上、空間的な広がりを持つものとして記述し、少数のニューロン同士でどのような論理演算の方式が可能になるかについて検討した。

2 方法

生体内では細胞同士(神経細胞に限らず)が細胞間隙を挟んで離散的に存在する。そこで興奮場を細胞と対応して考え、これを拡散場を介して配置した。方法としては、興奮場及び拡散場の性質を偏微分方程式で記述し、入力側と出力側の興奮場の形状を非対称にして、興奮波の伝播の様子を差分のシミュレーションで調べた。

本研究では興奮特性を記述する式としては FitzHugh-南雲方程式を用いた [3]。FitzHugh-南雲方程式は神経伝導方程式という意味合いも持つが、同時に u が activator、 v が inhibitor の非常に一般化された反応拡散方程式の形をしており、例えば現実空間での BZ 反応などの反応拡散系を定性的にはほぼ表現できる。つまり、ある特定の物理量に拘束されない。

なお、通常 FitzHugh-南雲方程式は空間固定もしくは一次元であるが、本研究では細胞を場とみなすため、二次元に拡張して用いている [4]

$$\begin{cases} \tau \partial u / \partial t = -\gamma \{ ku(u - \alpha)(u - \beta) + v \} \\ \quad + D_u \nabla^2 u \\ \partial v / \partial t = \gamma u \end{cases}$$

ここで、 u は activator、 v は inhibitor に相当する。この方程式の性質を持たせた反応拡散場(細胞

胞のイメージ、 $\gamma = 1$) を形状を非対称にして拡散場 ($\gamma = 0$ かつ $v = 0$) を介して配置した。

このような条件下において興奮場形状の非対称性を変えることによって、場から場への反応波の伝播の様子を調べた。本論文では以上のコンセプトに基づいて考案した論理演算素子について報告する。

3 興奮場でのロジック演算

3.1 整流作用

現象としては、閾値を越えた量の activator u が拡散場を介した他の興奮場に到達した場合、対岸の興奮場でも興奮反応が起こる。この現象を以下の文中では信号が伝播したと呼ぶことにする。

ロジック演算素子を作製する前に、実現しておきたい一つの機能がある。それは整流作用(ダイオード特性)を持つ素子である。整流作用自体は神経細胞においては信号の伝播様式に見られ、またダイオードは現在の電子工学的な論理回路設計の基礎でもある。興奮場から拡散場への興奮波の拡散分布が、興奮場の形状や興奮波の進行状況にどのように依存するかを調べた結果、形状その他を変えることによって閾値を越える量の activator u が拡散する距離を制御できることがわかった。

この事実を用いて、閾値を越える量の activator u の拡散距離が異なる形状の興奮場同士を組み合わせることによって、興奮波の伝播は方向性を持つことができる。そこで次の二種類の形状のダイオードを考え、シミュレーションを行なった。図1の(a)(b)では左から右方向のみ、(c)(d)では右から左方向のみ信号(興奮波)を伝播させるという整流作用を示すことがわかる。なお、図1で示しているのはどちらもダイオード特性を示すような間隙の幅のときであるが、どちらの形状でも、興奮場間の距離を変えることによって、双方向性、単方向性(ダイオード)、そして対岸に伝播せず信号の消滅という3種類の応答を示すことがわかった。ちなみに、(a)(b)の形状では、現実空間で、時空間的パターンを生み出すので知られている、BZ 反応という系を用いてダイオード特性が見られることが既に実証されている [6]。

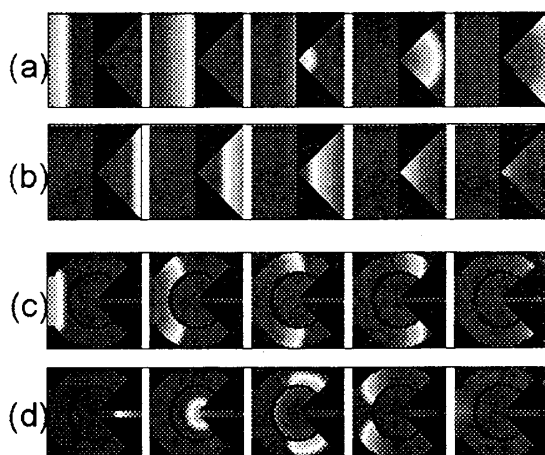


図 1: (a)(b),(c)(d) 二種類のダイオード。灰地は興奮場 (反応拡散場)、黒地は拡散場を、白っぽい部分は興奮波を表し、白いほど inhibitor v の濃度が高いことを表している。右に行くに従って時間が経過する。(a),(c) は左端から入力が行なわれ、(b),(d) は右端から入力が行なわれる。(a)(b) の形状では左から右のみ信号が伝播し、(c)(d) の形状では右から左のみ信号が伝播するという、信号伝播に方向性があることがわかる。

3.2 論理演算

次に、論理演算についてであるが、全ての論理関数は、積項の和形式あるいは和項の積形式で表せ、それらは論理和 (OR)、否定 (NOT)、論理積 (AND) の 3 つの基本的な論理素子から合成される。すなわち、論理和、否定、論理積の論理演算を実現する論理素子があれば任意の論理関数が合成できることになる。実際に電子回路上で論理関数を実現する場合には、上述した 3 つの論理素子があればよいが、実現容易性などから 3 つの論理素子の代わりに NAND(AND 素子の出力に NOT 素子を接続したもの)、NOR(OR 素子の出力に NOT 素子を接続したもの) の二つの素子が一般的に使用されている。この論文では、基本的に論理回路が組めることを示すのが目的であるので、関数の実現にあたって一般的な先の 3 つの論理素子を作製した。

論理和 (図 2) では上方及び右方から入力があり、左下方に出力がされるような形状、配置に設定した。入力及び出力の興奮波が存在するかないかを真理値の 1 及び 0 で表現すると、入力が二方向からでも ($1 \vee 1 \rightarrow 1$) 一方向からでも ($1 \vee 0 \rightarrow 1$) 左下方向に出力され、論理和に対応すると言える。なお、片方の入力からもう片方の入力への逆流を防ぐために、3 つの興奮場の間隙は、興奮波が境界に垂直方向に入力されてきたら対岸に伝播するが、進行方向と並行の境界からは対岸には伝播しないような条件に幅をとった。

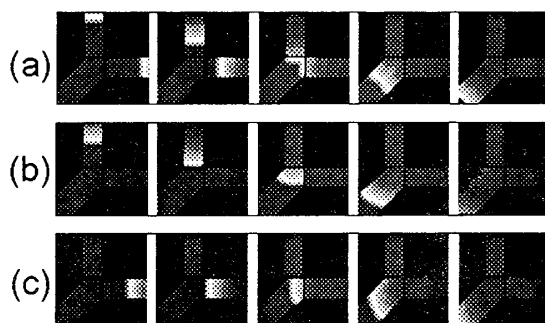


図 2: 論理和演算。右に行くに従って時間が経過する。右端と上端から入力が行なわれ、左下端に出力される。(a) は入力が二つ、(b) は入力が一つの場合を示している。どちらの場合も信号は出力側に伝わり、出力される。灰地は興奮場 (反応拡散場)、黒地は拡散場を表している。

次に否定演算についてであるが、反応拡散系において、興奮波の存在で真理値を表そうとするならば、一対の入力及び出力のみの組合せでは ($\neg 0 \rightarrow 1$)、つまり無から有を生み出すのは無理がある。そこで、否定演算素子としては、図 3 の様に左方向からの参照信号を必要とするものを設定した。上方からの入力があった場合、参照信号と打ち消しあって右方向への出力はない ($\neg 1 \rightarrow 0$)。入力がない場合、参照信号がそのまま右側に伝わり出力される ($\neg 0 \rightarrow 1$)。この素子でも、参照信号側から入力側、及び入力側から出力側への流れ込みを防ぐために、3 つの興奮場の間隙は、興奮波が境界に垂直方向に入力されてきたら対岸に伝播するが、進行方向と並行の境界からは対岸には伝播しない条件に幅をとった。

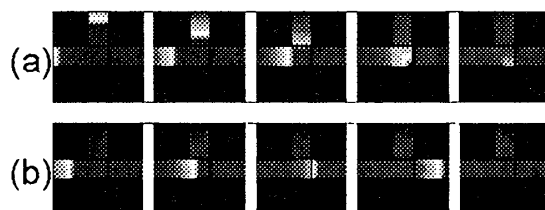


図 3: 否定演算。右に行くに従って時間が経過する。左端からは参照信号が入力される。演算する入力は上端から行なわれ、右端に出力される。(a) では、入力信号は参照信号と衝突し、出力側には何も伝播しない。(b) では、入力がないため、妨害するものがなく、参照信号がそのまま伝播して出力となる。

論理積 (図 4) では通常の論理積にさらに時間条件を課したものとなっている。上下からの入力が丁度中央でぶつかる場合は左側に出力されるが ($1 \wedge 1 \rightarrow 1$)、入力のタイミングがずれた場合、出力はされない ($1 \wedge 0 \rightarrow 0$)。先の 2 つの演算素子とは異なり、真理値の 1 には興奮波の存在と、かつタイミングの一致、という条件が対応する。この

性質を用いれば、入力の場合と出力の場合の間隙を調整することによって検出する入力のタイミングの幅を持たせたり、出力先を複数作ることによって特定の時間差の入力を検出したりすることができる。

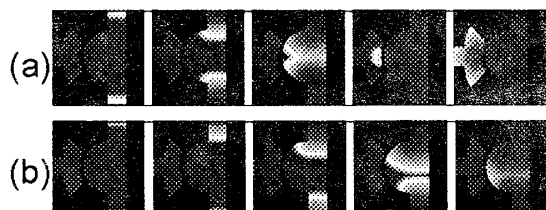


図 4: 論理積演算。右に行くに従って時間が経過する。上端と下端から入力され、左端に出力される。(a) は入力のタイミングが同時で入力同士が真中で衝突した場合、(b) は入力のタイミングがずれ、下の方で衝突した場合を示している。入力側の場と出力側の場はちょうど真中の部分が狭くなっているため、二つの入力が入真中で衝突した場合にのみ、左側に出力される。

3.3 時間演算

先の論理積回路での入力の時間差検出という機能を主目的に形状を作製すると、次の様になる。

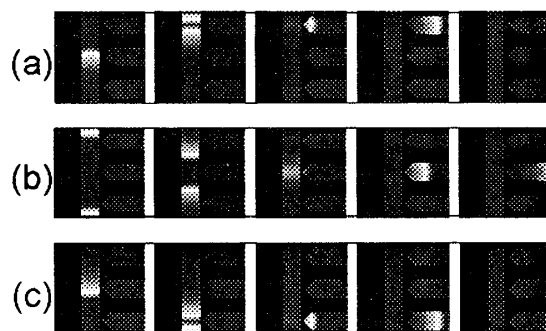


図 5: 時間差検出回路。右に行くに従って時間が経過する。上端と下端から入力され、右側に出力される。(a) は入力同士が上方で、(b) は入力同士が中央で、(c) は入力同士が下方で、丁度それぞれの出力先の付近で衝突した場合、それぞれの出力先に伝播することを示している。なお、それ以外のところで衝突した場合はそこで興奮波は消滅する。

この素子では出力先を 3 つ設置してあるが、論理積素子と同じメカニズムで検出したい時間差を持った入力のみを簡単に検出できることがわかる。これは、例えば生物は聴覚の神経に入ってきた音の時間差などの情報から音源方向を定位するが、その定位のメカニズムの解明に対して、モデル研究の立場から何らかの知見を与えられるのではないかと考えられる。

4 考察及び今後の課題

本論文に書いた時点では反応拡散場の形状の非対称性のみを変化させることによって、ダイオードや論理演算素子を作製することができた。さら

に論理積素子などは同時に入力の同期をとる回路としても働くことがわかった。現時点ではまだノイマン型を越えるという地点までは到達していないが、少なくとも形状を変えるのみで演算の種類を変えられる、ということと、参照クロックなしで演算できる可能性がある、ということは従来までの研究にはない視点であり、興味深い点だと言える。今回は演算素子のみの報告であるが、反応拡散場を用いれば時系列のデータを空間ループ上で進行するパルス列の形で保存することにより、短期メモリを作ることにも可能であることを指摘しておきたい。

現在の神経研究の流れの一つとして、入力が同期をとるかどうかが決まってくる [5]、という説が最近有力視されてきており、本研究と関連するものとして注目される。

また、同じ形状の素子であっても活性度を調節したり (数式上は、ヌルクラインの安定点である交点をずらすことに対応する)、拡散係数を大きくしたりすることによって、信号の伝播状況が異なるのは興奮場 (反応拡散場) という性質からは明らかであるが、このような性質は生物における各種伝達物質 (メッセンジャーやホルモン等) の役割と対応させることができる。より生物らしい情報処理のメカニズム構築を目指す上で、今回提唱した興奮場を用いた演算は従来のニューラルネットワークモデルや半導体などとは異なり、動的な時間特性を積極的に利用していることを強調しておきたい。

今後は、さらに時間演算のアイデアを発展させること、個々の素子をつなげて、高度な情報処理を行なう回路を設計すること、そして興奮場を固体表面上に作製し、演算回路を現実空間で組立てることを目標としている。

参考文献

- [1] W. McCulloch and W. Pitts, *Bull. Math. Biophys.*, **5**, 115-133 (1943).
- [2] A. Hodgkin and A. Huxley, *J. Physiol. (London)*, **117**, 500-544 (1952).
- [3] R. FitzHugh, *Biophys. J.*, **1**, 445-466 (1961).
- [4] K. Yoshikawa, I. Motoike and K. Kajiyama, *IEICE Trans. Electron.*, **E80-C**, 931-934 (1997).
- [5] E. Vaadia, I. Haalman, M. Abeles, H. Bergman, Y. Prut, H. Slovin and A. Aertsen, *Nature*, **373**, 515-518 (1995).
- [6] K. Agladze, R. R. Aliev, T. Yamaguchi and K. Yoshikawa, *J. Phys. Chem.*, **100**, 13895-13897 (1996).