

# ラット前頭葉を模倣した脳モデルの構築に関する基礎研究 ～セルラー場による順応学習の実現～

5W-3

川島貴弘\* 羽倉淳\* 横井浩史\* 瀧田正寿\*\* 嘉数侑昇\*  
\*北海道大学 \*\*生命工学工業技術研究所

## 1. はじめに

本論文では、ラット前頭葉での刺激-反応系を模倣することにより、人工システムにおける順応学習機能の実現を目指し、脳機能のモデル化を行う。

近年、ラット前頭葉皮質において、同一刺激入力に対する反応性が減弱する、いわゆる順応現象が発見されている。この現象は、脳内情報処理における重要な機能の一つである新規性の検出に大きく関与するものと考えられている。さらには、個体の行動における「慣れ」、つまり順応学習にも関与していることが明らかにされつつある[1]。しかし、その詳細なメカニズムは解明されていない。

ここでは、セルラー場[2]の導入により、このような事象と類似の挙動を示すような数理モデルを展開する。具体的には、パラメータを含む形で記述したセルの状態遷移則を、遺伝的探索手法により獲得させることでその実現を試みる。

## 2. 工学への展開

前頭葉における機能は、臨床的に表1のように階層的にカスケード状を成すと考えられている[3]。前頭葉における一次機能とされる“抑制的調節”は、既知入力に対する抑制であり、“新規性検出”とは未知入力に対する促進であると解釈できる。つまり、情報処理という視点から捉えた際、これらの機能は、情報の分別を行う機能であるため、人工システムにおいて実現することにより、新規性検出が可能な情報処理システムの構築が期待できる。

一次機能	抑制的調節 新規性検出
二次機能	内的環境 sustainedとphasicの注意 時間パターン
三次機能	刺激→行動 決心 忍耐 計画と記憶の生成 新規の考察 経験の順序 現実の確認 虚偽と行為の評価

表1: 前頭葉皮質機能のカスケード[3]

一方、in vivoでのラット前頭葉において、薬物刺激パターンに対するカルシウムイオン濃度の変化を観測した実験が行われている。その実験により、カルシウム濃度の増加量が、同一薬物刺激を加えるにつれ、相対的に減少していくという報告がなされている[1]。このことは、同一刺激パターンに対する反応性の低下を示しており、ラットの脳神経細胞群において順応現象が起こっていると考えられる。

そこで、本論文では、セルラー場[2]を用いることにより、このラット前頭葉における順応現象と同様なダイナミクスをもつ数理モデルの構築を試みる。

以下、その具体的なモデル化について記述する。

## 3. 前頭葉皮質モデル

ラット前頭葉におけるカルシウムイオンの濃度変化により測定される神経細胞群の反応の場としてセルラー場を定義し(図1)、ここでの各セルに局所的状態観測に基づく状態遷移則を獲得させる。しかし、生体脳における順応現象の詳細なメカニズムは明らかにされていない。このため、状態遷移関数をパラメータを含む形式で記述し、遺伝的探索手法(ここでは Genetic Algorithm;以下 GA)によりラット脳内の現象と同様な挙動を示すパラメータの探索を行う。以下、状態遷移関数のみの記述を行う。

多重セルラー場:  $CF = \{CF_i | i=0, \dots, M\}$

M個のセルラー場により構成される

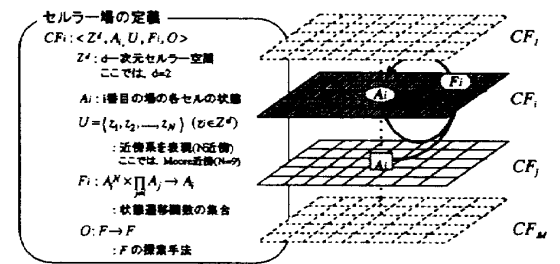


図1: セルラー場

i番目のセルラー場  $F_i$  を構成する各セルの局所的なダイナミクスは、以下(1)式で決定される。

$$F_i(Ai_{x,y}^{t+1}) = \sum_{u \in N_D} \alpha_{ND}^i (Ai_{x+u_x, y+u_y}^t - Ai_{x,y}^t) \cdot \beta + \sum_{u \in N_S} \alpha_{NS}^i (Ai_{x+u_x, y+u_y}^t - Ai_{x,y}^t) \cdot \beta + \sum_{j \neq i} \gamma_{j,i,y} \quad (1)$$

$Ai_{x,y}^t$ : 時刻 t における位置 (x, y) のセルの状態値

$\alpha_{ND}^i, \alpha_{NS}^i$ : 位置 (x, y) にあるセルからのユークリッド距離がそれぞれ 1,  $\sqrt{2}$  に対応するセルの状態値に対する反応係数。

さらに、神経細胞の受容体における同一刺激に対するデセンシタイズーション(脱感作)をモデル上でも実現するため変数  $\beta$  を導入する。

$$\beta = 1 - \zeta \cdot [I((Ai_{x,y}^t - Ai_{x,y}^{t-1}) - TH) \cdot (1 - \phi(v))] \quad (2)$$

$\zeta$  は予め設定する定数で、 $TH$  はセルの状態値の変化量に関する閾値である。さらに、 $I(x)$  は、 $x > 0$  では 1,  $x \leq 0$  の場合 0 をとる関数。また、 $\phi(x)$  は、 $x=0$  の場合には 0,  $x \neq 0$  では 1 を示す関数である。

また、(1)式の最右項は、様々な脳内物質間の相互作用を表現するための項で、以下(3)式のとおりである。なお、 $\zeta, \psi$  は j 番目からの反応係数、オ

フセット係数をそれぞれ表している。

$$\gamma_{i,x,y} = (\xi_{ji} \cdot A_{j,x,y}^i + \psi_{ji}) \cdot \frac{(A_{j,x,y}^i)^2}{(A_{j,x,y}^i)^2 + 100} \quad (3)$$

(1)から(3)式において、 $\alpha_{ND}^i$ ,  $\alpha_{Ns}^i$ ,  $\xi_{ji}$ ,  $\psi_{ji}$  および  $TH$  を未知のパラメータとし、GA による探索を行う。

#### 4. 計算機シミュレーション

##### 4.1 実験設定

場の数  $M$  を 2, 各場のセル数は  $50 \times 50$  とした。GA パラメータは、ポピュレーションサイズを 50, 突然変異率は 0.1 とし、GA オペレータとしては、突然変異のみを行った。適合度は、GA により決定される場に対し、同一刺激を一定間隔おきに 3 回加え、場の反応性の減少量に比例して与えた。

なお、GA のストリングをデコードする際、 $\alpha_{ND}^i$ ,  $\alpha_{Ns}^i$ ,  $\xi_{ji}$ ,  $\psi_{ji}$  の 4 つのパラメータは、 $[-1, 1]$  の実数値とし、 $TH$  に関しては、 $[0, 1]$  の実数値とした。

GA により決定されるセルラー場に対し、同一刺激のみの場合と、異種刺激を含めた場合の 2 つの実験結果を次に示す。

##### 4.2 実験結果

中央部付近の 2 点に刺激を与える刺激 I と中央に 1 点の刺激 II の二つの刺激を用いた。刺激強度は、1 点につき 50 である。

##### ・同一刺激のみを加えた場合

モデルに対し、刺激 I を時刻 1(Input1), 時刻 101 (Input2), 時刻 201(Input3) の 3 回加えた。図 2 は、このセルラー場の中央部  $20 \times 20$  の領域の反応強度をグラフ化したものである。横軸は経過時刻  $t$  を、縦軸は反応強度を表している。また、図 3 はセルラー場の時間的な状態遷移を示しており、色が濃くなるほど、反応度が高いことを表している。

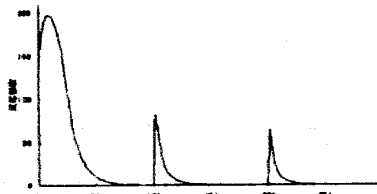
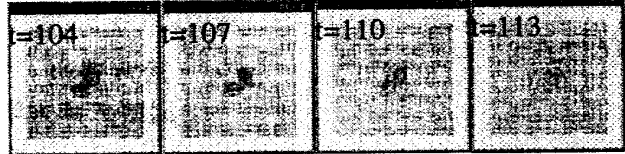


図 2: セルラー場の反応強度

Input 2



Input 3

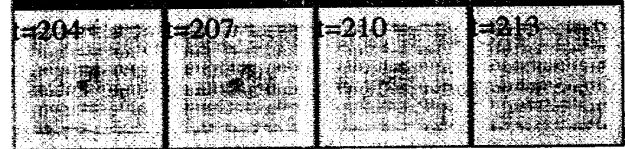


図 3: 時間的遷移

##### ・異種刺激を加えた場合

刺激 I を 2 回加えた後、刺激 II を 2 回、最後に再び刺激 I を加え、計 5 回の刺激を与えた。ここでは、反応強度のグラフのみを図 4 に示す。

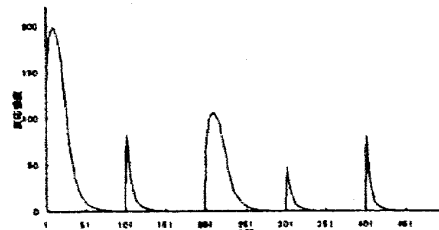


図 4: 反応強度

#### 5. 考察

以上の結果より、同一刺激に対して反応性の減弱が見られた。また、その後異種刺激を加えた場合、場の反応度が上昇しているのがわかる(図 4, 時刻 201)。これにより、入力刺激パターンに対する異種か同種かの分別能力を有するものと考えられる。さらに刺激 I を加えているが(図 4, 時刻 401)、ラット生体脳において、このような反応性を示すかどうかは、明らかではない。しかし、工学的な視点から見た場合、本モデルでは、情報を分別する機能が備わっており、ここで目的とする順応学習や、パターン認識などの人工システムにおける情報認識機構の一部としての応用が期待できる。また、その具体的な実現が今後の課題となる。

#### 6. おわりに

本論文では、ラット前頭葉の刺激-反応系を模倣した脳機能モデルの構築を、セルラー場を用いて行った。また、GA によるパラメータ探索により、神経細胞群が示す順応現象と同様な現象を本モデル上で再現した。

#### 参考文献

[1]: Takita.M, "Desensitization of  $[Ca^{2+}]_i$  to NMDA and Habituation of Glutamate Release in Rat Prefrontal Cortex", pp.2316, Society for Neuroscience Abstract 23(2), 1997  
 [2]: Wolfram.S, "Cellular automata and complexity; collected papers", Addison-Wesley, 1994  
 [3]: Knight.R.T and Grabowecky.M, "Escape from linear time: Prefrontal cortex and conscious experience", The Cognitive neurosciences, pp. 1357-1371, MIT press, 1995

Input 1

