

神経場による記憶保持モデルの構築

1 L - 3

藤田 修 嘉数 侑昇
北海道大学

1. はじめに

記憶の構造は、一般に記録・保持・想起の3つからなると言われる¹⁾が、ここではニューラルネットワークの1つである神経場に着眼し、短期記憶、長期記憶、それら間での情報の転送の3つの機能からなる、記憶保持モデルを構築することを試みる。つまり、①短期記憶層：興奮波のリバーベレーション²⁾による情報の保持、②中間層：リバーベレーションからの刺激パターン抽出、③長期記憶層：神経細胞間の結合荷重による情報の保持、以上の3つの要素を神経場により構成し、これらを実現するためのパラメータを数値実験を行うことにより求める。

2. 神経場

神経場は、神経細胞が空間的に連続にあるものとして取り扱ったモデルで、甘利ら³⁾により以下のように記述されている。

m 層からなる神経場の第 i 層において位置 \mathbf{x} にある神経細胞の時刻 t の興奮度 $u_i(\mathbf{x}, t)$ は、

$$\tau_i \frac{\partial u_i(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = -u_i(\mathbf{x}, t) - h_i + s_i(\mathbf{x}, t) + \sum_{j=1}^m \int w_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') \cdot Z_j(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' \quad (1)$$

$i=1, \dots, m$

で表される。ここで、 τ_i は時定数、 h_i はしきい値、 s_i は外部入力、 $w_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{x}')$ は第 j 層から第 i 層への結合関数、 Z_j は第 j 層の出力である。

ここでは、神経場の記述としてはこれを用いるが、記憶保持モデルとしての応用を考えると、その実現に不可欠な動作を得るため、さらに結合関数など特定の構造を設定する必要がある。

3. 記憶保持モデル

短期記憶層・中間層・長期記憶層から構成されるこのモデルは、場に入力として刺激が与えられたとき、その刺激パターンを記憶することを目的とする。

まず刺激は短期記憶層に与えられる。短期記憶層において刺激パターンの情報は、場の活動状態によって保持される。刺激が与えられたときそれぞれの刺激位置を中心に同心円状に興奮波のリバーベレーションが起り、各刺激によるリバーベレーションがセグメンテーションされた安定状態により保持されるものとする。

一方、長期記憶層においては、与えられた刺激の近傍に局所結合を形成し、かつ同時に与えられた刺激間に結合を

形成する。このように場の内部にネットワーク構造を組織することにより情報を保持する。

このとき問題となるのは、短期記憶から長期記憶への情報の転送である。つまり、短期記憶の情報は場に分散した動的なものであるからこのままでは長期記憶への情報の転送が不可能である。そこで中間層において、短期記憶層におけるセグメンテーションされたリバーベレーションから、与えられた刺激パターンを抽出し、これを長期記憶層への入力とする。

以上の記憶保持モデルを実現可能とするための神経場モデルを以下に示す。

■短期記憶層

興奮性結合を持つ a 層と抑制性結合を持つ b 層とにより、リバーベレーションを起こす。

$$\tau_{1a} \frac{\partial u_{1a}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = -u_{1a} + \int w_{1a1a}(\mathbf{x}-\mathbf{x}') I(u_{1a}(\mathbf{x}, t)) d\mathbf{x}' + \int w_{1a1b}(\mathbf{x}-\mathbf{x}') I(u_{1b}(\mathbf{x}, t)) d\mathbf{x}' + s_{1a}(\mathbf{x}, t) - h_{1a} \quad (2)$$

$$\tau_{1b} \frac{\partial u_{1b}(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = -u_{1b} + w_{1b1a} I(u_{1a}(\mathbf{x}, t)) - h_{1b} \quad (3)$$

$$w_{1i}(\mathbf{x}) = A_i \exp(-\alpha_i^2 \mathbf{x}^2 / \sigma_i^2) \quad (4)$$

■中間層

短期記憶層との結合を相互抑制型結合とし、セグメンテーションされたリバーベレーションの中心を抽出する。

$$\tau_2 \frac{\partial u_2(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = -u_2 + \int w_{21a}(\mathbf{x}-\mathbf{x}') I(u_{1a}(\mathbf{x}, t)) d\mathbf{x}' - h_2 \quad (5)$$

$$w_{21a}(\mathbf{x}) = (1 - \mathbf{x}^2 / \sigma_2^2) \exp(-\alpha_2^2 \mathbf{x}^2 / \sigma_2^2) \quad (6)$$

■長期記憶層

中間層との結合を相互抑制型とすることにより局所結合を、長期記憶層内部の自己結合の更新関数を(9)式で与えることによりネットワーク構造をそれぞれ形成する。

$$\tau_3 \frac{\partial u_3(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = -u_3 + \int w_{32}(\mathbf{x}-\mathbf{x}') I(u_2(\mathbf{x}', t)) d\mathbf{x}' + \int w_{33}(\mathbf{x}, \mathbf{x}') I(u_3(\mathbf{x}', t)) d\mathbf{x}' - h_3 \quad (7)$$

$$w_{32}(\mathbf{x}) = (1 - \mathbf{x}^2 / \sigma_3^2) \exp(-\alpha_3^2 \mathbf{x}^2 / \sigma_3^2) \quad (8)$$

$$\Delta w_{33}(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = \begin{cases} c & s(\mathbf{x}_1) > 0 \text{ and } s(\mathbf{x}_2) > 0 \\ -c & s(\mathbf{x}_1) > 0 \text{ and } s(\mathbf{x}_2) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{ただし } s(\mathbf{x}) = \int w_{32}(\mathbf{x}-\mathbf{x}') I(u_2(\mathbf{x}', t)) d\mathbf{x}'$$

4. 実験

以上のモデルにおいて、目的とする動作を実現するパラメーターを実験により求めるものとする。

■短期記憶層

2次元の神経場において、パラメーターを以下のように設定したとき、図.1に示すようにリバーレーションが観察された。

$$\begin{aligned} \tau_{1a} &= 1.0 & \tau_{1b} &= 1.0 \\ h_{1a} &= 0.5 & h_{1b} &= 0.5 \\ A_{1a} &= 1.0 & A_{1b} &= -4.0 \\ \alpha_{1a} &= 1.0 & \alpha_{1b} &= 1.0 \\ \sigma_{1a} &= 3.0 & \sigma_{1b} &= 1.0 \\ W_{1b1a} &= 2.0 \end{aligned}$$

■中間層

1次元の神経場において、パラメーターを以下のように設定したとき、刺激位置をリバーレーションの中心位置 x と対応する細胞の発火として取り出すことができた。

$$\begin{aligned} \tau_2 &= 0.9 & h_2 &= 0 \\ \alpha_2 &= 0.6 & \sigma_2 &= 0.8 \end{aligned}$$

結果を図.2に示す。

■長期記憶

1次元の神経場において、パラメーターを以下のように設定することにより、長期記憶層内部の自己結合について図.3に示すような結合荷重の分布を得ることができた。これより、2つの頂点からなるネットワーク構造の形成を見ることができる。

$$\begin{aligned} \tau_3 &= 1.0 & h_3 &= 0 \\ \alpha_3 &= 0.8 & \sigma_3 &= 2.0 \\ c &= 0.02 \end{aligned}$$

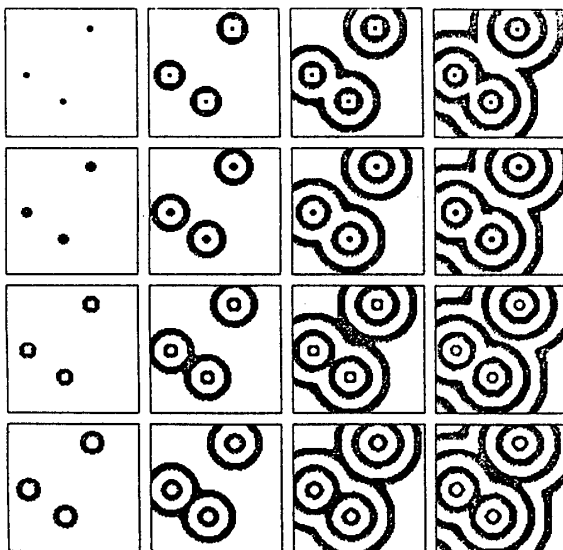


図.1 短期記憶層におけるリバーレーション

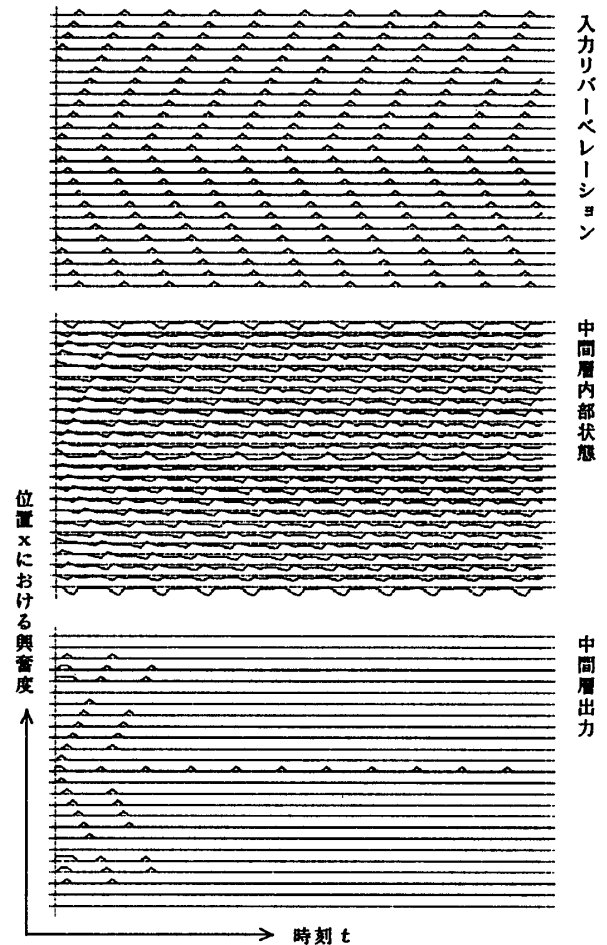


図.2 中間層による刺激位置抽出

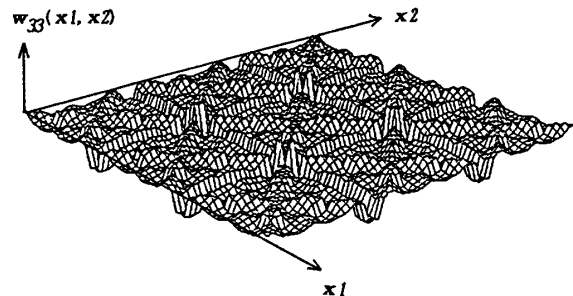


図.3 長期記憶層の結合荷重の分布

5. おわりに

記憶保持モデルとして、①短期記憶層、②中間層、③長期記憶層を神経場により構成するモデルを提案し、その実現に不可欠なパラメーターを計算機実験により求めた。

参考文献

- 1) R.L.クラツキー：記憶のしくみ，サイエンス社(1982)。
- 2) 吉沢修治，甘利俊一，南雲仁一：神経回路網のリバーレーションについて，電子通信学会誌，Vol.54, No.10, pp1364-1373 (1971)。
- 3) 甘利俊一：神経回路網の数理，産業図書(1978)。