

神経回路網の入力刺激に対する応答の振舞い

竹崎智康*・鳥岡豊士**・戸根和之*・平田威彦***

Behaviour of Response in a Neural Net for Input Stimuli

Tomoyasu TAKEZAKI, Toyoshi TORIOKA, Kazuyuki TONE and Takehiko HIRATA

Abstract

We give a simple neural network consisting of excitatory and inhibitory neural elements and study some fundamental properties with the neural net. We clean up the competitive process in the neural net and the effect of the hysteresis of both elements on it. We also give and explain some interesting behavior of responses which the neural net shows under static input stimuli.

1. 緒言

神経回路網の研究には2つの立場がある。その1つは生体系に見られる神経回路網を対象とした研究である。Kilmer, McIlloch, Blum の網様体モデル¹⁾ Marr のパターン分離機能をもつ小脳モデル²⁾ などはこの立場から研究されている。もう一つの立場は生体系の特定の神経回路網にとらわれず、多数の神経素子から成る一般的な回路網を考え、その性質を明らかにしていく立場である。この立場からの研究は甘利の側抑制神経場のモデルや³⁾ Dev の立体視の神経モデル⁴⁾ に見られる。本文では後者の立場に立ち、興奮性、抑制性の素子から成る基本的神経回路の刺激に対する応答について考察する。まず神経回路網の競合の過程、及び素子の持つヒステリシス特性の競合過程におよぼす影響を明らかにする。次に静的刺激に対する神経回路網の振舞いについて具体的に調べる。

2. 神経回路網の説明

一般的な神経回路網を Fig.1 に示す。この回路においてE層の素子は興奮性であり、I層の素子は抑制性である。興奮性の各素子は重み関数 w_1 で、まわりの素子から興奮性の影響を受ける。同時に抑制性の素子より重み関数 w_2 を介して抑制性の入力を受ける。Fig.2に重み関数 w_1, w_2 の例を示す。一方抑制性の素子はそれと対応するE層の興奮性素子のみから重み

関数 w_3 を介して興奮性の入力を受ける。なお左端の素子と右端の素子は同じ結合方式 (rap-around 方式) で接続されているものとする。ここで興奮性の素子の電位を U_E 、抑制性の素子の電位を U_I 、素子の出力関数を f とすると、両層における k 番目素子の電位の動的変化は次の微分方程式で表わせる。但しE層、I層の素子は同質 (homogenous) とする。

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dU_{E_k}}{dt} = -U_{E_k} + \sum_k w_1 f(U_E) - \sum_k w_2 f(U_I) - h_1 + S_{1k} \\ \tau_2 \frac{dU_{I_k}}{dt} = -U_{I_k} + w_3 f(U_{E_k}) - h_2 + S_{2k} \end{cases} \dots\dots(1)$$

但し、 $f(\alpha) = \begin{cases} 1 : \alpha > 0 \\ 0 : \alpha \leq 0 \end{cases} \dots\dots(2)$

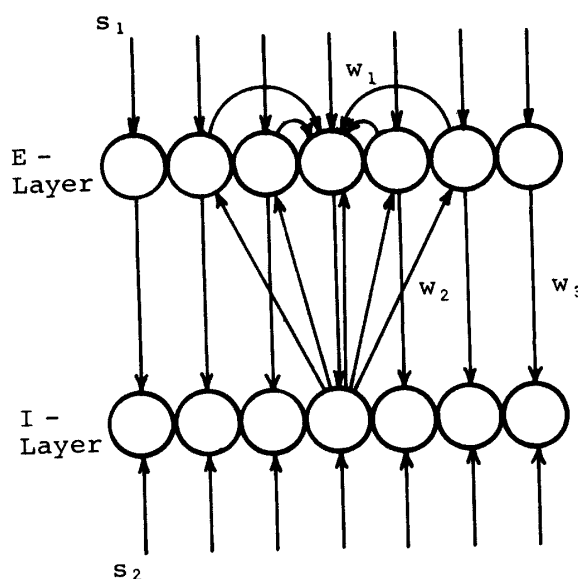


Fig.1 Neural Net.

* 大学院電気工学専攻
** 工業短期大学部情報処理工学科
*** 電気工学科

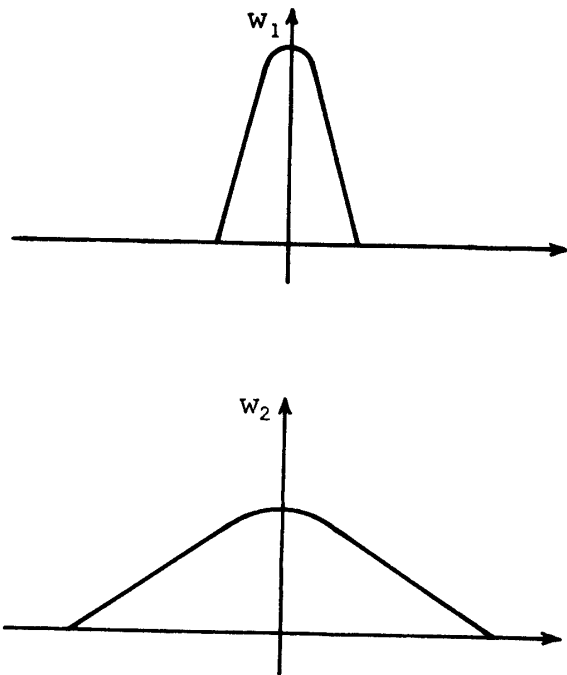


Fig.2 Weighting functions w_1 and w_2 .

ここに、 U_{Ek} 、 U_{Ik} はそれぞれE層における k 番目素子の電位、I層における k 番目素子の電位を示す。また $\sum_k w_1 f(U_E)$ 、 $\sum_k w_2 f(U_I)$ はE層 k 番目素子が k 素子を中心として両側の素子から対称に受ける興奮性相互作用の総和、抑制性相互作用の総和を示す。もちろんこの相互作用は w_1 、 w_2 によって定まる。 τ は時定数、 h は素子の閾値レベル、 S は入力刺激である。

さてこの回路網の刺激に対する振る舞いを式(1)を用いて調べるのは解析的になりに困難である。それゆえ、ここでは重み関数 w_2 の幅が非常に広い Fig.3 のような回路網の振る舞いを考察する。従ってE層の全

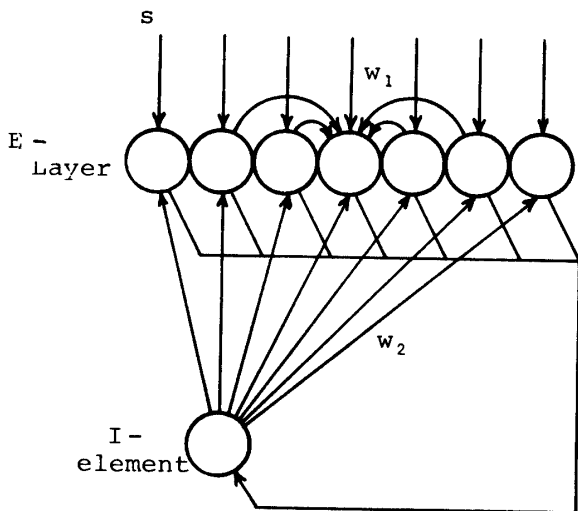


Fig.3 Basic neural net.

素子は近似的に等しい重み w_2 を介して、I素子から同じ大きさの抑制入力を受けることになる。ここに式(1)は、

$$\begin{cases} \tau_1 \frac{dU_{Ek}}{dt} = -U_{Ek} + \sum_k w_1 f(U_E) - w_2 g(U_I) - h_1 + S_1 \\ \tau_2 \frac{dU_I}{dt} = -U_I + \sum_j f(U_{Ej}) - h_2 \end{cases} \dots\dots(3)$$

$$g(\alpha) = \begin{cases} \alpha & : \alpha > 0 \\ 0 & : \alpha \leq 0 \end{cases}$$

と書き改められる。

3. 回路網の刺激応答

3.1 基本的回路の競合過程

Fig.3 に示した神経回路網の最も基本的な場合として、2つの興奮性素子と1つの抑制性素子から成る回路網の競合過程を調べてみよう。Fig.4 にこの回路網を示す。素子1, 2に刺激 S_1 、 S_2 が加えられたとしよう。各素子の電位の動的過程は次の式で示される。

$$\begin{cases} \frac{dU_{El}}{dt} = -U_{El} + w_1 f(U_{E1}) + w_1 f(U_{E2}) - w_2 g(U_I) - h_1 + S_l \\ \tau \frac{dU_I}{dt} = -U_I + f(U_{E1}) + f(U_{E2}) - h_2 \end{cases} \dots\dots(4)$$

但し、 $l=1, 2$

しかしこの式は非線形微分方程式であるため一般的に解くことが困難である。それゆえ計算機シミュレーションを用いて各素子間の競合過程を調べてみよう。Fig.5 にこの例を示す。この図で各パラメータは、 $S_1=0.6$ 、 $S_2=0.5$ 、 $w_1=1.0$ 、 $w_2=1.0$ 、 $h_1=0.3$ 、 $h_2=0.2$ 、 $\tau=0.5$ である。(同じ結果は文献(5)にも示されている。) ここで競合過程を3つの区間に分けて詳細に見てみよう。各区間で両素子の電位が次のような

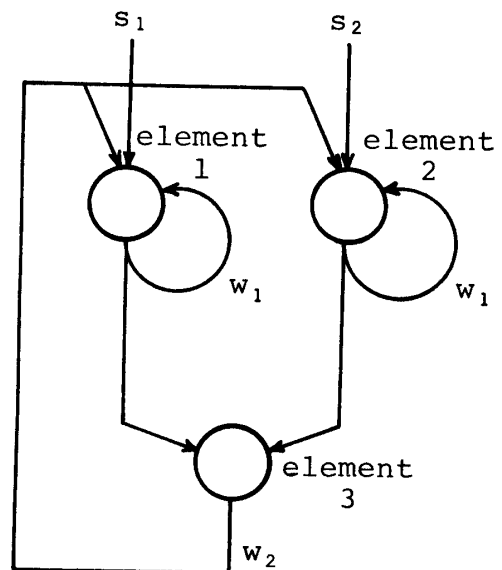


Fig.4 Simplified neural net.

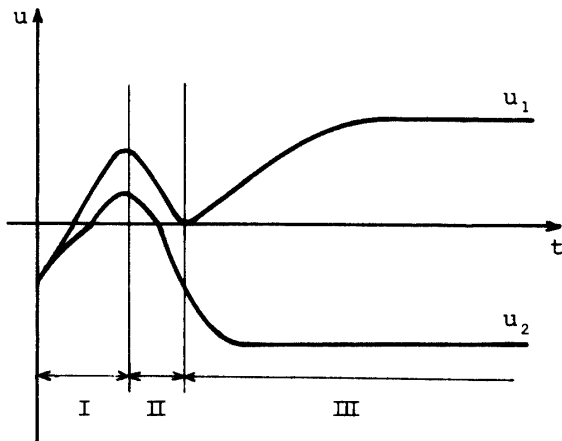


Fig. 5 Process of competition in the neural net given by Fig. 4.

変化過程を示すことがわかる。

- (I) 素子 1, 2 の電位は閾値レベル $-h_1$ より立ち上がり始める。そして入力刺激の大きい方が先に正の値となり出力を出す。この出力は自分自身をさらに励起すると同時に抑制素子の電位を高める。
- (II) 抑制素子の電位が閾値レベル $-h_2$ より立ち上がり始め、 U_I が正になると出力を出す。この出力は素子 1, 2 を抑制し電位 U_{E1}, U_{E2} を下げる。
- (III) 電位 U_{E1}, U_{E2} のうちどちらかが負になると、その素子は興奮性の回帰入力を失ない、さらに電位を下げる。一方両素子に対する抑制も減少するため、正の電位を保っている方の素子は電位の減少速度を下げ、そのうち増加を始める。そしてそのまま定常値に近づいていく。

以上の考察から、パラメータを適当に選ぶことにより素子 1, 2 が入力の大小によって競合を行ない、打ち勝ったものだけが発火するという競合過程を示すことがわかる。この競合過程は基本的な回路網で実現できる興味ある情報処理過程の 1 つである。

次に注目すべき点は、この競合過程に伴って回路素子の示すヒステリシス特性である。これを明らかにするためのシュミレーション結果を Fig. 6 に示す。シュミレーションの条件は S_1, S_2 を除き Fig. 5 と同じである。入力刺激の大小関係は $t=5$ の時点で入れ変わる。この際一度定常状態に達した U_{E1}, U_{E2} はほとんど変化せず、電位の大小関係は $t < 5$ の時と同じである。これは明らかに一種のヒステリシス特性である。次にこのヒステリシスの定量的特性について説明しよう。Fig. 7 に (4) 式から得られる素子の刺激 S と出力 t の関係を示す。Fig. 7 (a) は素子が興奮し

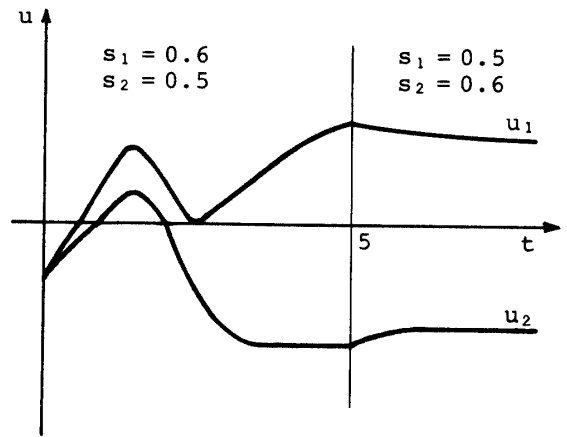
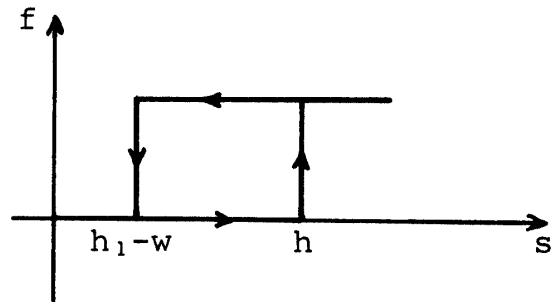
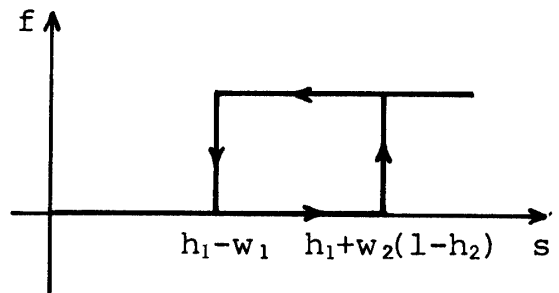


Fig. 6 Process of competition in the neural net, where stimuli is changed at $t=5$.



(a) non-excited element.



(b) excited element.

Fig. 7 Properties of hysteresis.

ていない場合であり、(b) は 1 素子が興奮している場合である。(a) の場合素子は興奮していないため抑制入力存在せず、入力が閾値 h_1 を越えると出力を出す。一度素子が興奮すると、その素子は合計 w の励起を受け、刺激入力が $h_1 - w$ 以下になるまで興奮を続ける。但し $w = w_1 - w_2(1 - h_2)$ とする。(b) の場合一方の素子が既に興奮しており、興奮していない素子は $w_2(1 - h_2)$ なる抑制入力を受けている。そのため閾値レベルがその分だけ増加していると考えられ、入力が $h_1 + w_2(1 - h_2)$ を越えて初めて発火する。このように

ヒステリシス特性が神経回路の刺激に対する振舞いを大きく左右することを銘記しておく必要がある。(詳細は文献(5)を参照。)ここで回路の各パラメータの変化が電位の動的過程にどのような影響を与えるかをTable.1に示す。

Table.1 Effect of the parameter on the dynamic process of potentials, u_1 and u_2 .

w_1	自己励起の量を決定する係数であり、大きい程発火の際の立ち上がり速度が大きくなり、遂には完全なる自己励起状態となる。
w_2	抑制の量を決定する係数であり、大きい程電位の減衰速度が大きくなる。結果として、興奮性素子が発火を続けるために、より多くの刺激入力を必要とする。
h_1	興奮性素子のしきい値であり、小さい程刺激に対して敏感になる。これは同刺激入力に対しては、発火するまでの時間が短くなることを意味する。
h_2	抑制性素子のしきい値であり、小さい程抑制性素子が発火しやすくなる。
τ	抑制性素子の電位変化の時定数であり、大きい程電位の立ち上がりがゆるやかになる。そのため興奮性素子は、より高い電位まで立ち上る。

3.2 1次元配列を持つ回路網の静的刺激に対する応答

ここでは Fig.3 に示した回路網が静的刺激に対して示す応答の振る舞いを調べる。特に入力刺激に対応する近傍の素子のみが応答する条件を調べる。簡単のため重み関数 w_1 は Fig.8 に示すような形をとるものとする。

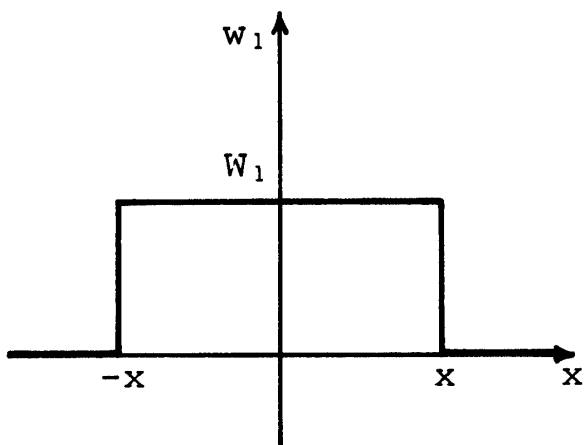


Fig.8 Weighting function w_1 .

3.2.1 入力刺激が1個の場合の回路網の応答

入力刺激として矩形の入力を用いた場合、素子の電位の平衡状態は一般に次の3つの場合に分けられる。

- (a) どの素子も発火しない。
- (b) ある一定の領域の素子のみが発火する。
- (c) すべての素子が発火する。

このうち (a) と (c) の状態は重み係数 w_2 を大きくしたり小さくしたりすることによって容易に得られ、

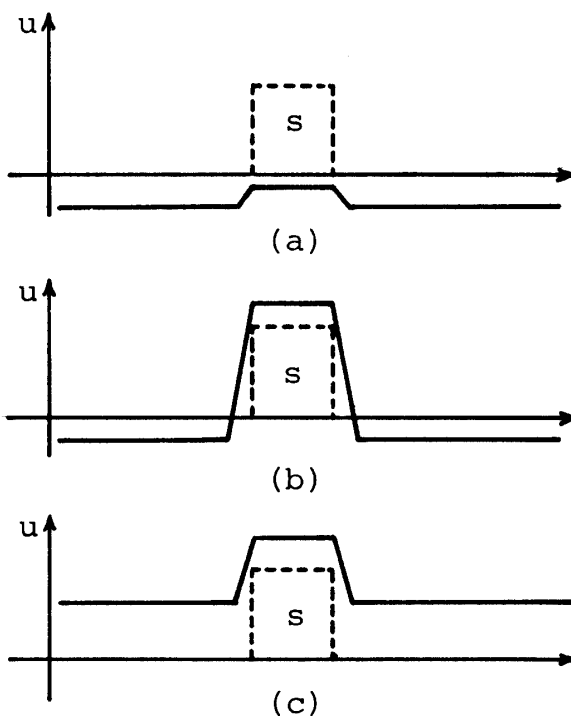


Fig.9 Process of response for a stimulus s .

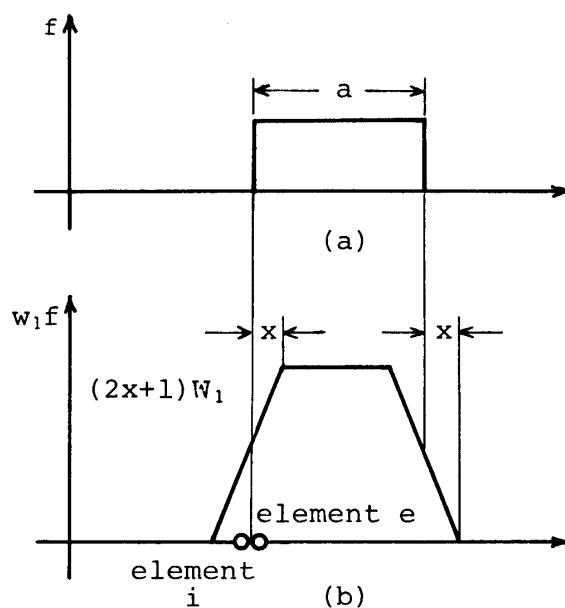


Fig.10 Excitatory interaction between excitatory elements.

また興味ある性質も示さない。従ってここでは入力刺激興奮性の影響、抑制がうまく釣り合って初めて取り得る (b) の条件を求める。

まず最初に各素子に返ってくる w_1 による興奮性の相互作用について定量的に調べてみよう。ある範囲の素子が興奮し、Fig.10-(a) のように出力を出しているとする。簡単のためE層の興奮範囲の長さ a を $a > 2X+1$ とする。このときある素子 k がまわりより受ける興奮性の相互作用の総和 $\sum_k w_1 f(U_E)$ は、近傍の $2X+1$ 個の素子から影響を受けるので、Fig.10 (b) に示す台形状となる。従って興奮している最も端の素子 e が受ける入力 $W_1(X+1)$ 、その隣りの興奮していない素子の入力は W_1X となる。以下二つの場合に分けて Fig.10-(b) の状態となり得る条件を求める。

i) 入力刺激幅 $< a$ の場合

入力刺激 S_j 、素子の電位 U_{Ej} 、素子の出力 $f(U_{Ej})$ 、相互作用の総和 $\sum_j w_1 f(U_E)$ は Fig.11 に示すような関係となる。今定常状態を考えているため (3) 式において $dU_{Ek}/dt=0$ となる。よって興奮している最も端の素子 e の電位 U_{Ee} は

$$U_{Ee} = \sum_j w_1 f(U_E) - w_2 g(U_I) - h_1 + S_e$$

$$= W_1(X+1) - w_2(a-h_2) - h_1,$$

またその隣りの興奮していない素子の電位 U_{Ei} は

$$U_{Ei} = \sum_j w_1 f(U_E) - w_2 g(U_I) - h_1 + S_i$$

$$= W_1X - w_2(a-h_2) - h_1$$

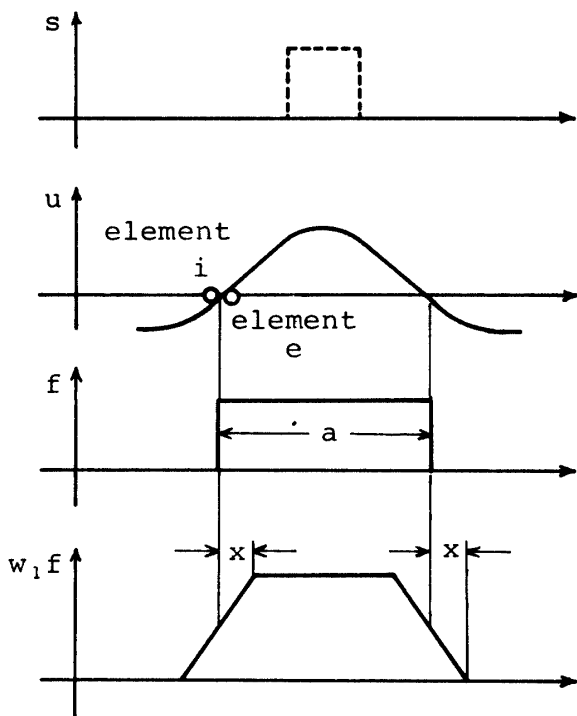


Fig.11 Response in such a case that the width of excited region becomes large than that of stimulus.

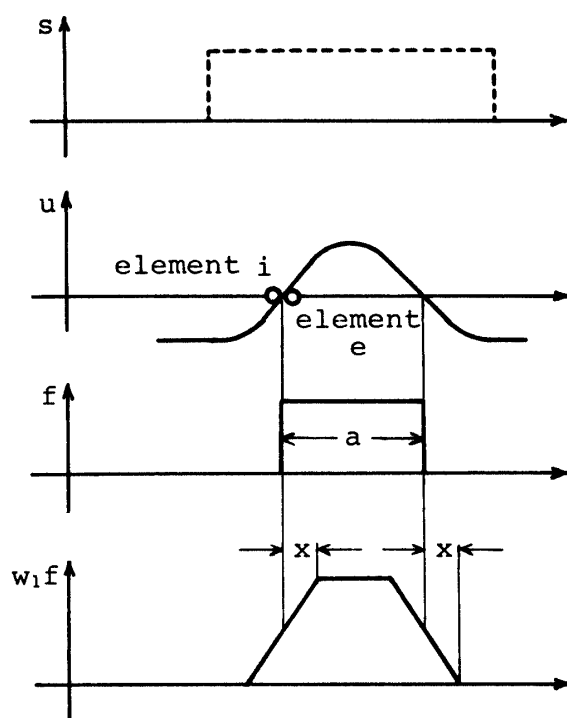


Fig.12 Response in such a case that the width of excited region becomes narrower than that of stimulus.

となる。ここで一定幅 a で興奮するためには $U_{Ee} > 0$ 、 $U_{Ei} < 0$ であればよい従って a の範囲は

$$\frac{W_1X - h_1}{w_2} + h_2 < a < \frac{W_1(X+1) - h_1}{w_2} + h_2 \dots (5)$$

となる。

ii) 入力刺激幅 $> a$ の場合

入力刺激 S_j 、素子の電位 U_{Ej} 、素子の出力 $f(U_{Ej})$ 、相互作用の総和 $\sum_j w_1 f(U_E)$ は Fig.12 に示すような関係にある。興奮している最も端の素子 e の電位 U_{Ee} は

$$U_{Ee} = \sum_j w_1 f(U_E) - w_2 g(U_I) - h_1 + S_e$$

$$= W_1(X+1) - w_2(a-h_2) - h_1 + S$$

その隣りの興奮していない素子の電位 U_{Ei} は

$$U_{Ei} = \sum_j w_1 f(U_E) - w_2 g(U_I) - h_1 + S_i$$

$$= W_1X - w_2(a-h_2) - h_1 + S$$

となる。ここで $U_{Ei} < 0$ 、 $U_{Ee} > 0$ なるための a の条件は、

$$\frac{W_1X - h_1 + S}{w_2} + h_2 < a < \frac{W_1(X+1) - h_1 + S}{w_2} + h_2 \dots (6)$$

となる。

3.2.2 入力刺激が2個の場合の回路網の応答

Fig.3 の回路網に対して2つの入力刺激が与えられ

た場合の刺激応答について調べてみよう。ここでは解析と計算機シミュレーション実験をもとに説明を進めていく。

この回路網に 3.2.1 と同様に静的な 2 個の刺激が与えられた場合の一般的な応答形を Fig.13 に示す。(a) と (d) の応答は重み関数 w_2 を大きくしたり小さくしたりすることにより容易に得られる。一方(b), (c) の応答は刺激, 興奮性入力, 抑制性入力がかみあって初めて得られる。ここではこの応答形が得られる条件を求める。

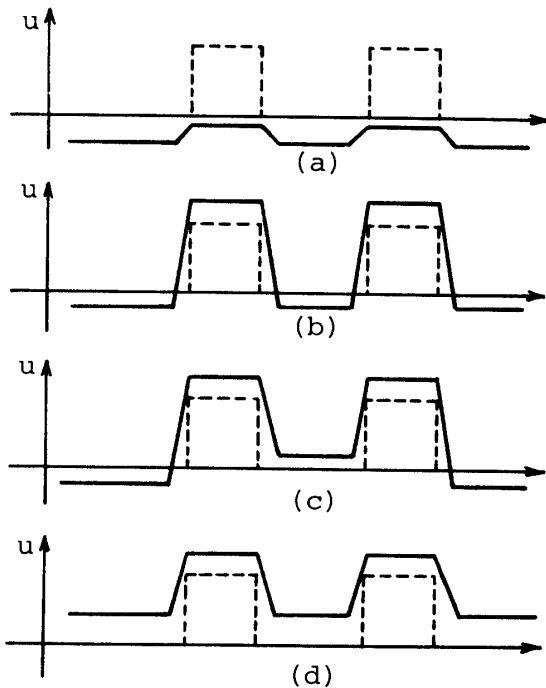


Fig.13 Process of response for two stimuli.

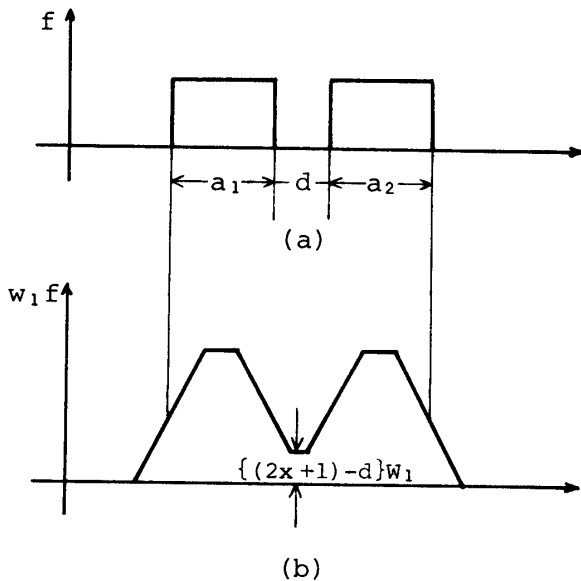


Fig.14 Interaction between two excited regions in case $d < 2x+1$.

i) 両刺激の間隔 $> 2X+1$ の場合

素子の出力が Fig. 14-(a) に示す形をとるとき, 素子がまわりの素子より受ける興奮性の入力の総和は Fig.14-(b) に示す形となる。ここに a_1, a_2 は興奮の幅, d は興奮領域の内側の距離とする。刺激入力の中心の素子 i の電位 U_{Ei} は定常状態において

$$U_{Ei} = W_1 \{ (2X+1) - d \} - w_2 (a_1 + a_2 - h_2) - h_1$$

となる。応答形 Fig.13-(b) を得るためには $U_{Ei} < 0$ であるから d の条件は

$$\frac{W_1(2X+1-d) - w_2(a_1+a_2-h_2)}{W_1} < d \quad \dots\dots(7)$$

となる。素子の興奮の間隔 d がこの条件を満足するとき E 層の電位は Fig.13-(b) の形状となる。

ii) 両刺激の間隔 $< 2X+1$ の場合

この場合 (3) 式の定常平衡状態から E 層における刺激応答を明らかにすることはかなり困難である。なぜならば両興奮領域が相互に干渉をもつためである。それゆえこの干渉により付近一帯すべてが発火するという状況が生じる。この過程を Fig. 15 に示す。以上のシミュレーション結果をもとに上記 (c) の応答形が得られる過程及び理由を述べる。

まず入力刺激が与えられる。(Fig. 15-(a)) 入力刺激の部分のみが発火する。(Fig. 15-(b)) この発火によってまわりの素子が発火する。(Fig. 15(c)) 一帯の素子すべてが興奮するため刺激の中心にある素子が受ける相互作用も等しい値となる。(Fig. 15-(d)) 次に抑制入力により全体的に電位が低下する。この際刺激

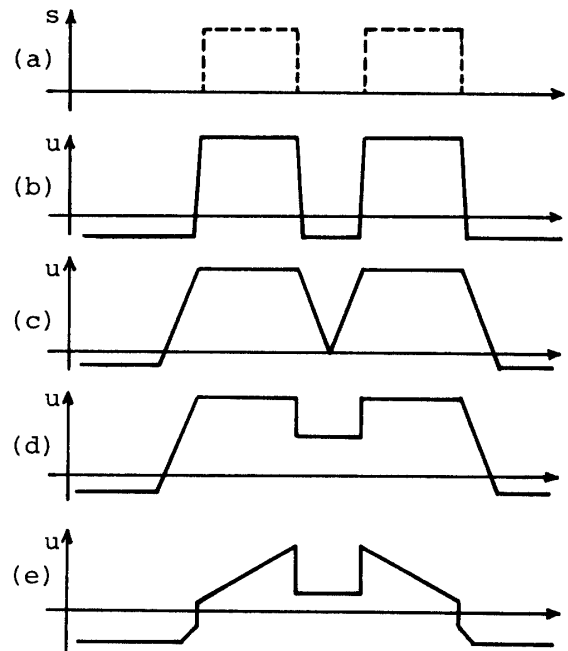


Fig.15 Interaction between two excited regions in case $d < 2x+1$.

入力間にある素子は外側の素子より多く興奮入力を受けているため競合に打ち勝ち発火状態を保ち、一方外側は興奮しなくなり興奮領域は狭くなる。(Fig. 15-(e)) 以上の過程の結果として Fig. 13(c) の応答形が得られる。

iii) ii) の特殊な例

ここで ii) の特殊な例として、いかに入力刺激が接近しても興奮がつかない、つまり刺激の入った場所のみに応答が得られる条件を求めてみよう。

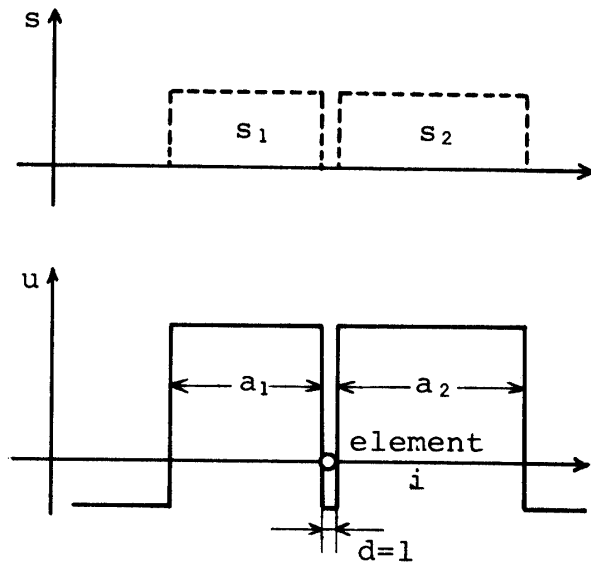


Fig.16 Excited regions which coincides with the widths of stimuli s_1 and s_2 .

Fig. 16 に示される 2 つの入力刺激が最も近づいた状態 ($d=1$ の状態) を考えよう。図中に示された素子はこの際 $(2X+1)W_1$ の興奮性相互作用を受ける。この素子の定常状態の電位 U_{Ei} は

$$U_{Ei} = (2X+1)W_1 - w_2(a_1 + a_2 - h_2) - h_1$$

となる。従って $U_{Ei} < 0$ から

$$W_1 < \frac{h_1 + w_2(a_1 + a_2 - h_2)}{2X+1} \quad \dots\dots(7)$$

が得られる。この条件を満足すれば刺激入力の場合の

みに応答が得られる。

4. ま と め

本文では多数の興奮性素子と 1 つの抑制性素子から成る神経回路を考え、この回路網の入力刺激に対する応答の動的過程を非線形微分方程式で記述した。次に刺激に対する応答の振る舞いを非線形微分方程式の平衡状態とシュミレーション実験から考察してきた。この考察から次の事実が明らかになった。

- (1) 基本的な神経回路網で競合のような興味ある機能可以实现できる。
- (2) ヒステリシス特性は神経回路網の刺激応答の振る舞いに大きな影響を与える。
- (3) パラメータを適当に選ぶことにより入力刺激に対応するある定まった応答が得られる。
- (4) 刺激応答が 2 つ得られる場合、内側より外側の方が大きな抑制を受ける。このため両刺激が近くにある場合、応答は融合し 1 つの刺激応答として振る舞うようになる。

今後の課題として、以上得られた基本的な事実をもとに動的な入力に対する神経回路網の応答の振る舞いを調べるものが残されている。

参 考 文 献

- 1) W.L. Kilmer, W.S. McCulloch and J. Blum: Int. J. Man-Machine Studies, 1, 276 (1979)
- 2) D. Marr: J. Physical., 208, 437 (1969)
- 3) S. Amari: COINS Techical Report, The Center for Systems Neuroscience University of Massachusetts (1976)
- 4) P. Dev: Int. J. Man-Machine Studies, 7, 511 (1975)
- 5) J. Metzler ed.: System Neuroscience Academic Press, (1977) p.119
- 6) 竹崎他: 神経回路網の入力刺激に対する応答, 昭和 54 年電気四学会中国支部連合大会予稿集 (昭和 54 年 10 月 15 日 受理)