

氏 名	う さ み ひと ひで 宇 佐 見 仁 英
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 53 年 3 月 24 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 情報工学専攻
学 位 論 文 題 目	時系列入力情報に対する相互抑制神経回路のシミュレーションに関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 佐藤利三郎
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 佐藤利三郎 東北大学教授 松尾 正之 東北大学教授 木村 正行 東北大学助教授 長沢 庸二

## 論 文 内 容 要 旨

### 第 1 章 緒 論

最近の電子技術の進歩には、目を見はるものがある。しかし、人間が容易にできるパターン認識や微細な制御等を機械が代行する技術は、十分に研究開発されていない。従って、生物神経系におけるすぐれた情報処理機構を解明し、その応用を計ることが工学分野における重要な課題である。

このような観点から、本研究は神経系における基本的な情報伝送処理のメカニズムを明らかにするため、最も単純化された結合回路である相互抑制神経回路に注目する。相互抑制神経回路は、興奮性および抑制性入力の相互作用によって情報処理を行う回路で、生物神経系の随所に見られる基本的な回路である。この種の神経回路の統計的性質を工学的立場から解析するため、実際の神経細胞の特徴を定量的に記述した 4 種類のモデルを提案し、各モデルに適した確率統計的手法

を用い、相互抑制神経回路の特徴を明らかにしている。

## 第2章 神経系における情報伝送および処理機構

本章では、神経系における基本的な情報伝送処理機構である相互抑制神経回路の構成と生理学的性質について述べている。相互抑制神経回路は、図1に示す様に2つの神経細胞から構成される回路で、結合様式によって順方向型（以下順方向抑制回路）と逆方向型（逆方向抑制回路）の相互抑制神経回路がある。この回路は、片方の神経細胞が頻繁に発火すると他方の細胞が抑制されることになり、発火しにくくなる性質を持っている。この現象は、手足の拮抗的なりズム運動を発生するメカニズムとして説明されている。さらに、この回路は、視聴覚神経系における基本的な結合回路として、組織解剖学的に随所に見られている。特に視覚神経系における多並列相互抑制神経回路は、視覚心理実験において明らかにされているマッハバンド効果や各種の錯視現象および対比同化現象を説明する回路である。

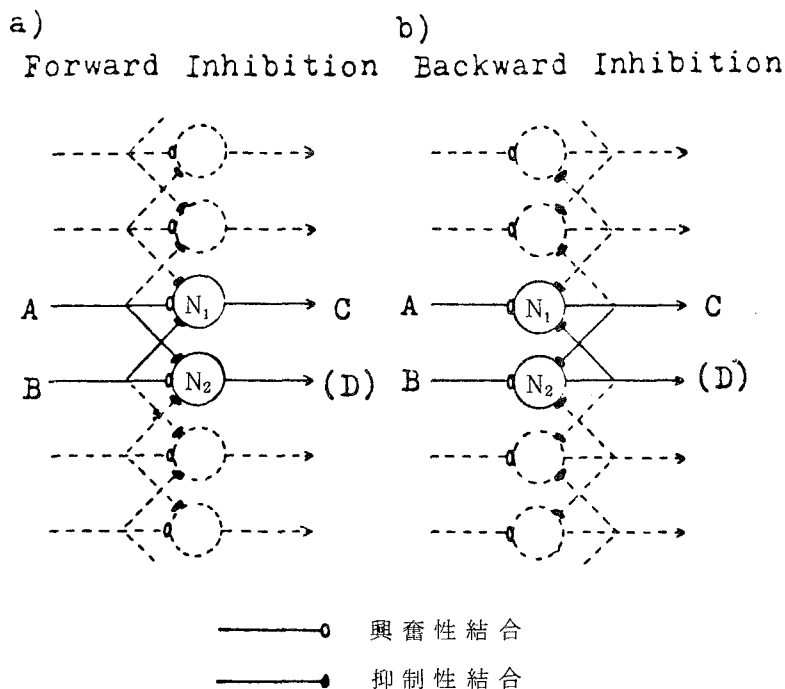


図1 実線は相互抑制神経回路を、破線は相互抑制神経回路を1次元状に拡張した多並列相互抑制神経回路の構成を示している。

### 第3章 相互抑制神経回路を構成する神経細胞の数学的モデル

本章では、相互抑制神経回路のモデルとして、実際の神経細胞の生理学的特徴に対する近似度から、次に示す4種類のモデルを提案している。

#### 1) アナログ型モデル

神経細胞の入出力インパルス系列を単位時間当りの時間間隔で観測し、その時間間隔内に存在する神経インパルスの個数を変数として相互抑制神経回路の特性を解析するモデルである。このモデルの特徴は、神経インパルスを1つ1つ取り扱わないため、入出力特性を非常に単純化することができる。そのため、多数の神経細胞で構成される様な神経回路網に適用できる。しかし、このモデルでは、神経インパルス系列の時間構造の情報が考慮されないため、神経系における本質的な情報処理のメカニズムである興奮性および抑制性入力の詳細な相互作用を明らかにすることができない。

#### 2) デリレーションモデル

このモデルは、インパルス入力時系列を確率論的手法により理論的に取り扱うため、最も基本となる抑制作用だけに注目して、次の様な仮定が行われている。『単一神経細胞において、興奮性シナプスに到来する相続く神経インパルスとインパルスの間に、抑制性シナプスに到来する神経インパルスが1つ以上存在する場合、その抑制性入力の直後の興奮性入力がただ1つ削除される。削除されずに生き残った神経インパルスが出力を形成し、それが神経細胞の発火系列に対応する。』

図1に示す様に、入力端A, Bに到来する神経インパルスのうち、どちらか一方をポアソン過程とすると、出力系列の時間間隔分布を理論的に導出できる。A入力系列の時間間隔の密度関数を $f(t)$ , B入力系列の分布関数を $G(t)$ , 出力系列の密度関数を順方向抑制回路の場合 $p_F(t)$ , 逆方向抑制回路の場合 $p_B(t)$ で表示する。また、それぞれのラプラス変換形を $\tilde{f}(s)$ ,  $\tilde{G}(s)$ ,  $\tilde{p}_F(s)$ ,  $\tilde{p}_B(s)$ で表示する。

A入力系列を $f(t)$ , B入力系列をパラメータ $\mu$ のポアソン過程とすると、出力系列は次式の様に表示される。

$$\tilde{p}_F(s) = \frac{\tilde{f}(s+\mu)}{1 - \tilde{f}(s) + \tilde{f}(s+\mu)} \quad 3-1$$

$$\tilde{p}_B(s) = \frac{\tilde{f}(s+\mu) - \mu\tilde{f}(s+\mu) + \mu\tilde{f}(s+\mu)\tilde{f}(s)}{1 - \tilde{f}(s) + \tilde{f}(s+\mu)} \quad 3-2$$

A入力系列をパラメータ $\lambda$ のポアソン過程, B入力系列を $G(t)$ とすると、出力系列は次式の様に表示される。

$$\tilde{p}_F(s) = \frac{\lambda - \lambda(s+\lambda) \tilde{G}_1(s+\lambda)}{\lambda(s+\lambda) - \lambda(s+\lambda) \tilde{G}_1(s+\lambda)} \quad 3-3$$

$$\tilde{p}_B(s) = \frac{\lambda - \lambda(s+\lambda) \tilde{G}_2(s+\lambda) - \lambda^2 [\tilde{G}_1(s+\lambda) - \tilde{G}_2(s+\lambda)]}{(s+\lambda) - \lambda(s+\lambda) \tilde{G}_1(s+\lambda)} \quad 3-4$$

ここで、 $\tilde{G}_1(s)$ はある時刻を経過した後、時刻  $t$  までにA入力インパルスが1つ以上到来する確率のラプラス変換形で、 $\tilde{G}_2(s)$ は同様に2つ以上到来する確率のラプラス変換形を示す。

上式のラプラス逆変換を行うことにより、出力系列の密度関数が導出でき、この式を基に1次統計量である平均、分散、さらに時間間隔ヒストグラム、パワースペクトルが求められる。

### 3) オートマトンモデル

入力系列の時間パターンに対する神経細胞の動作を規定したモデルで、興奮性および抑制性入力の相互作用を定量的に把握することができる。

オートマトンを次の5組のシンボル  $\langle X, S, Y, \{A(x), x \in X\}, F \rangle$  で定義する。

$X$  : 入力信号の有限集合  $\{x_1, \dots, x_r\}$

$S$  : 状態の有限集合  $\{S_1, \dots, S_n\}$

$Y$  : 出力の有限集合  $\{y_1, \dots, y_q\}$

$\{A(x)\}$  : 各入力パターンに対する神経細胞の内部状態の遷移で、 $r$ 個の  $n$  次の正方行列の有限集合  $\{A(x_1), \dots, A(x_r)\}$

$F$  :  $S$  から  $Y$  への関数

特に、 $\{A(x)\}$ の入力パターンに対する神経細胞の内部状態の遷移を確定的な遷移と仮定すると、モデルの動作はデリジョンモデルと一致する。このようなモデルを有限オートマトンモデルと呼ぶ。また、確率的な遷移を仮定すると、順方向抑制回路において、実際の神経細胞の特徴である不応期特性を考慮することができる。このようなモデルを確率オートマトンモデルと呼ぶ。

### 4) 実時間モデル

このモデルは、実際の生理学的機構の特徴である閾値、膜電位、EPSP、IPSP、絶対および相対不応期を考慮でき、モデルのパラメータ値として細胞内電極法による生理実験データをそのまま生かすことができる。これらの生理学的特徴は、閾値および膜電位の時間関数として、次の様に表現される。

$$H(t) = H_\infty + (H_0 - H_\infty) \exp[-\lambda_H(t - t_0)] \quad 3-5$$

$$P_n(t) = P_\infty + P_E \sum_{m=1}^{n_E} \exp[-\lambda_E(t - \sum_{i=1}^m T_{Ei})] \\ + P_I \sum_{m=1}^{n_I} \exp[-\lambda_I(t - \sum_{i=1}^m T_{Ii})] \quad 3-6$$

$H_{\infty}$  : 静止閾値       $H_0$  : 初期リセット閾値       $t_0$  : 絶対不応期  
 $\lambda_H$  : 閾値の減衰率       $P_{\infty}$  : 静止膜電位       $P_E$  : EPSPの頂点電位  
 $\lambda_E$  : EPSPの減衰率       $n_E$  : 興奮性入力 of 到来個数  
 $T_E$  : 興奮性入力 of 到来間隔       $P_I$  : IPSPの頂点電位       $\lambda_I$  : IPSPの減衰率  
 $n_I$  : 抑制性入力 of 到来個数       $T_I$  : 抑制性入力 of 到来間隔

出力としての神経細胞の発火、不発火は入力インパルス of 到来ごとに閾値 ( $H(t)$ ) と膜電位 ( $P(t)$ ) の大小関係で決定され、 $H(t) \leq P(t)$  なら発火、 $H(t) \geq P(t)$  なら不発火となる。

#### 第4章 相互抑制神経回路 of 統計的性質

第3章で特徴を明らかにした4種類の神経細胞モデルに対し、各々のモデルに適した統計的解析法を用い、相互抑制神経回路 of 統計的性質を明らかにしている。

統計的解析結果として、次の様な幾つか of 統計的性質が明らかとなった。

- 1) 相互抑制神経回路 of 出力系列 of 時間間隔分布は、マルチモーダル分布や混合指数分布を示す。
- 2) 順方向抑制回路において、両入力系列ともガンマ分布と仮定した場合、各々の山のピークを結んだ包絡線がB入力 (抑制入力) の分布型に良く一致している。
- 3) 実時間モデルにおける相互抑制神経回路 of 出力系列は、入力系列が全く独立な事象にもかかわらず、出力系列に時間従属性を持つという生理学的にも興味深い結果を示した。
- 4) 逆方向抑制回路 of 平均頻度伝達特性から、両入力系列とも正規分布とした場合、極めて急峻な変化を示し、相互抑制神経回路本来の相手側を抑制する機能を考え合わせると特徴的な結果といえる。
- 5) 有限オートマトンモデル of 再帰確率特性から、Bishopら<sup>1)</sup> of 生理実験データと一致するマルチモーダル分布を示す順方向抑制回路 of 再帰確率特性は、全出力インパルス of うち半分の1回で再帰 (立続けに発火すること) し、さらにその半分の2回で再帰 (1回抑制される)、さらにその半分の3回で再帰、……、という $1/2^N$ 特性を示す。このことは、相互抑制神経回路が何らかの符号化機構として動作していることを示唆している。
- 6) 相互抑制神経回路 of ゲイン特性から、順方向抑制回路においてBishopら<sup>1)</sup> of 生理実験データと一致する場合 of 回路 of ゲインが、低周波の部分で最大となる。このことは、生理学的機能と考え合わせると興味深い結果といえる。

#### 第5章 相互抑制神経回路 of 統計的性質と生理学実験結果との比較

前章で得られた相互抑制神経回路 of 統計的性質とBishopら<sup>1)</sup> が行った外側膝状体 of 生理実験データと比較検討している。その結果、生理実験データ of うち、マルチモーダル分布を示す結果

に対して順方向抑制回路の出力分布の2番目以降のピークが良く一致した。また、混合指数分布を示す結果に対しては逆方向抑制回路の出力分布の方が比較的良く一致することが明らかとなった。さらに、外側膝状体ニューロンの特徴と考えられるバースト現象を考慮したバーストタイプ実時間モデルで解析した結果、マルチモーダル分布における第1番目のピークも良く一致する結果が得られた。これらの結果から、外側膝状体における神経細胞の結合および特性を類推することができた。

## 第6章 一次元状の広がりを持つ多並列相互抑制神経回路の統計的性質

図1に示す様に、相互抑制神経回路を1次元状の広がりを持つ多並列相互抑制神経回路に拡張し、空間入力としてステップ状の頻度変化を仮定して解析した。その結果、次の様な統計的性質が明らかとなった。

1) 逆方向型神経回路において、デリーションモデルの入力系列をオーダ50のガンマ分布とすると、アナログ型モデルと同様な空間振動が見られるがオーダ1のガンマ分布では見られない。このことは、入力系列の分布型が多並列相互抑制神経回路において極めて重要なパラメータであることを示している。

2) 多並列相互抑制神経回路に実時間モデルを適用すると、実時間モデルの特徴である系列相関係数に次の様な特徴が現われた。順方向型神経回路では、入力系列の分布型の相違によって出力系列の平均頻度に明らかな差が現われるが、系列相関係数には差が現われない。逆方向型神経回路では、この差が全く逆の現象として現われる。このことは、この種の回路が出力系列の頻度と時間従属性の情報の上に入力系列の分布型の情報を包含する機構の存在を示唆しており、情報伝送工学上興味深い結果といえる。

## 第7章 結 論

この章では、本研究で明らかとなった点を簡単に箇条書きにまとめている。

### (文 献)

- 1) P.O. Bishop, W.R. Levick and W.O. Williams : stochastic analysis of the dark discharge of lateral geniculate neurons, J., Physiol., 170, 598-612 (1964).

## 審査結果の要旨

生物神経系におけるすぐれた情報伝送処理機構を工学的立場から解明しその応用を図る研究が盛んに行われるようになった。特に視覚神経系における情報伝送処理機構は、時空間的な情報を大量に伝送処理する機構で、情報工学の面で多くの示唆を与えている。著者はこのような伝送処理機構を構成する基本的な神経回路である相互抑制神経回路に着目し、情報工学的立場から統計的解析手法を用いその諸性質を明らかにした。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全文7章より成っている。

第1章は緒論である。第2章では、神経系における単一神経細胞の生理学的機能を述べ、これらの機能を組合せた相互抑制機能に対するモデルを提案している。

第3章では、相互抑制神経回路を統計的に解析するため、神経細胞の特徴的な機構を抽出し、定量的なモデル化を行っている。モデル化としては、1) 生理学的機能に対し最も単純化されたアナログ形モデル、2) 時系列入力情報に対し出力系列の確率分布を理論的に導けるデリージョンモデル、3) 不応期特性を考慮できるオートマトンモデル、4) 実際の生理学的機能を再現し得る実時間モデル、の4つを提案している。

第4章では、前章で示した4つのモデルに対し、相互抑制神経回路の統計的性質を明らかにしている。その結果、出力系列の時間間隔ヒストグラムがマルチモーダル分布や、混合指数分布等を示すことを明らかにした。特に実時間モデルを用いた場合、入力時系列が全く独立な事象にもかかわらず出力系列には時間従属性が有ることを明らかにしている。これは興味ある知見である。

第5章では、前章の結果をこれまでに得られている生理実験データと比較検討している。その結果、出力系列の時間間隔ヒストグラム、時間従属性等に良い一致が見られ、第3章で提案したモデルが妥当なものであることを示している。これは有用な成果である。

第6章では、モデルを多並列相互抑制神経回路に拡張し、視覚心理実験で明らかにされているマッハバンド効果に対してその発生メカニズムを明らかにしている。これは時系列入力情報に対する重要な知見である。

第7章は結論である。

以上要するに、本論文は神経系における基本的な情報処理機構である相互抑制神経回路を対象とし、その統計的性質を解析し、生理実験と比較検討することにより、生体機能に新しい知見を加えたもので、情報工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。