

氏 名	中 尾 光 之
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	昭和 59 年 3 月 27 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	確率システム理論に基づく神経インパルス時系列の 解析に関する研究
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

近年，情報処理の高速化，大量化等を実現する為に，並列・分散性を有する構造が制御・処理システム上で実現される傾向が顕現している。このような傾向は最近の VLSI さらにバイオ・チップ等論理素子の高度集積化技術の飛躍的な進歩によって，なお一層促進されようとしている。しかしながら，これを以ってしても情報処理の量的な発展は促されるかもしれないが，質的な改善は必ずしも大きくないように予想される。

上述した情報処理技術の質的向上を実現する為に，生体の神経系が有する適応・学習や自己組織化等の機構構成能力や，神経系活動の一大特徴である。その確率論的挙動の神経系情報処理における役割を調べ，これを採用することは制御・情報処理の分野における新たな理論的展開を生み出す上で重要である。

そこで本研究では神経系において，その情報伝送系列として機能している神経インパルス時系列の確率過程としての挙動に着目し，時系列の解析手法を確率システム理論に基づいて構成する。さらに，その有効性について種々の立場から検討を試みている。これらによって神経インパルス時系列が有する不確定性の情報処理における意味解明へ少なからず貢献することを本論文の目的としている。

## 第2章 神経系情報処理と確率的神経システム

本章では先ず、神経系情報処理機構の人工的なシステムには存在しない種々の特徴について述べると共に、神経情報を担っている神経インパルス時系列の確率論的挙動を積極的に解析し、その意味を探ろうとする本研究の立場の独自性及び重要性を他の研究と比較することにより明確化した。

又、解析の対象となる神経システムが、定常線形系であること、1入力-1出力系であること等、原則的に満たされるべき条件を掲げ、本神経システムはその構造及び動特性から確率システムとして把え得ることを示した。これにより神経システム及び神経インパルス時系列解析への確率システム理論の適用性が明らかになった。

さらに本論文において提案した解析手法の基礎となった確率システムに関する推定理論、中でもKalmanフィルタのアルゴリズムについて必要な範囲内でその概要を述べた。

## 第3章 神経インパルス時系列とその確率モデル

神経系を構成する個々の神経回路網の出力として観測される神経インパルス系列は系への入力の有無に拘らず確率的な振舞を現出するものが殆どである。ここでは神経システムの出力過程としてインパルス系列を把え、その確率的モデリングを行なった。この時神経システムモデルは神経回路網の動特性を反映した連続確率過程であるところの系過程（膜電位）を生成する部分と、これを閾値時間関数： $\theta(\tau) = \theta_\infty + m/\tau$ を以って神経インパルス時系列へと変換する部分との組合せで図1のように構成した。

神経システムモデルによれば神経インパルス時系列は、図2 a及びbに見られるように各インパルス発火時刻を起点とする系過程と閾値関数との初交差現象の繰返しによって生成されていることが判る。そこで先ず、モデルの統計的性質を調べる為に、インパルス

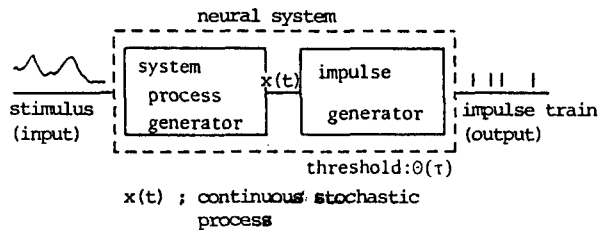


図1 神経システムモデル

の発火現象に関する系過程の初交差問題を解き、得られた初交差時間確率密度関数の $\theta_\infty$ 、 $m$ 等のモデルパラメータ依存性について述べた。

このようなモデルの構造を神経系情報処理を実現している個々の神経システムに適合するように決定することは各々のシステム固有の性質を知る上でも重要である。このことから、さらに神経システムの出力として観測された神経インパルス時系列からモデルパラメータを推定するアルゴリズムを初交差時間確率密度関数とインパルス間隔確率密度関数との等価性より導いた。提案したアルゴリズムの有効性は計算機シミュレーションにより確かめた。

本章で述べた神経インパルス時系列の発火機構のモデリング及びモデルパラメータの推定アルゴリズムは単独でも十分に神経システムの動特性の一端を明らかにし得るものである。

## 第4章 確率モデルに基づく神経システム系過程の推定

第3章で示した閾値関数  $\theta(\tau)$  のパラメータ推定アルゴリズムにより、その構造が決定された時、図2cに見られるようにインパルス間隔を計測することによって発火時点での系過程の値を知ることが可能となる。即ち、 $\theta(\tau)$  は系過程の観測装置として機能することになる。このようにしてインパルス系列は連続過程へ対応づけられ、既存の確率システム理論の適用が容易となる。この時観測される系過程のデータは図2cから判るようにランダムに欠損したものとなる。従って神経システム系過程推定はこれらランダム欠損データに基づいて行なわれる。

系過程はARX (auto regressive system with exogeneous input) モデルより生成されるものと仮定し、そのパラメータを推定することで神経システムを同定し、これを用いて系過程の推定を行なう。この時、ARX パラメータは上述の対応関係からインパルス系列の時間構造を反映したものとなっていることが判る。

ARX パラメータ及び系過程の推定を閾値関数が与えたランダム欠損データのみに基づいて、Kalman フィルタにより構成されたアルゴリズムを用いて試みた。計算機シミュレーションの結果、データの長期欠損区間での推定精度の劣化が図3aに示すように著しいことが判った。そこでこれら推定精度の劣化を改善する為に、インパルス系列の時系列情報を観測する推定アルゴリズムを線形化アルゴリズムの1つである拡張Kalmanフィルタに基づいて構成した。ここでは時系列情報としてインパルス系列の確率的発火強度を採用しており、これが逐一観測可能であることからデータ欠損区間においても系過程の挙動を間接的に知ることができる。この推定アルゴリズムを用いた計算機シミュレーション結果の例を図3bに示した。同図より明らかなようにデータ欠損区間での推定精度が先のアルゴリズムに比して向上しており、本アルゴリズムの有効性が確かめられた。このことは推定されたインパルス系列と真のインパルス系列との発火パターンの類似性からも裏付けられた。又、本アルゴリズムは適応的推定器であるKalmanフィルタを基礎として成立していることから実時間での適用が可能という有利な性質を具備している。

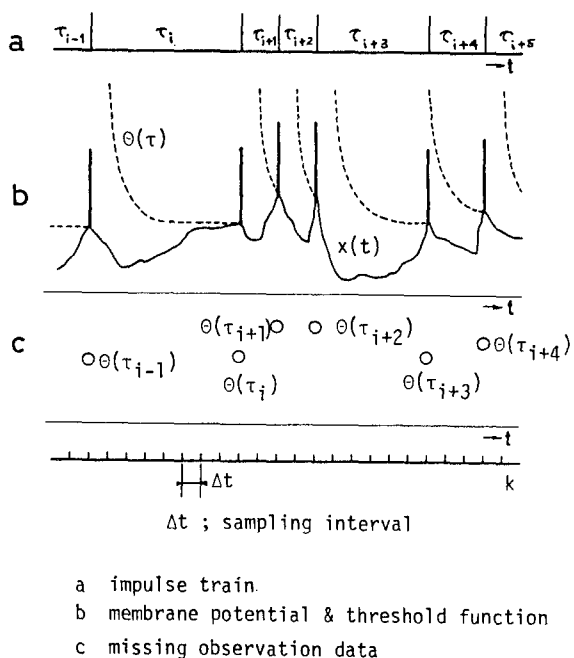


図2 神経インパルス時系列の生成と神経システム系過程の観測

## 第5章 神経システム系過程推定によるインパルス時系列の解析

前章で述べた神経システム系過程の推定アルゴリズムは第3章で述べた閾値時間関数のパラメータ推定アルゴリズムと共に神経インパルス時系列の解析手法を構成している。ここでは本解析手法の実際的条件下での有効性を種々の立場から検討している。

先ずデータ採取の為に行なったネコを用いた動物実験の内容を簡単に述べ、又、網膜内神経回路網の神経システムとしての性質を明らかにした。さらにM系列で輝度変調された光刺激を入力とした場合の応答インパルス系列に本解析手法を適用し、各々のアルゴリズムの動作特性について検討した。この結果から神経システムにおけるモデリングの妥当性が示唆され、又、計算機シミュレーションの場合と同様、欠損データのみに基づく推定アルゴリズムに対するインパルス系列の時系列情報を観測する推定アルゴリズムの優位性が明らかになった。

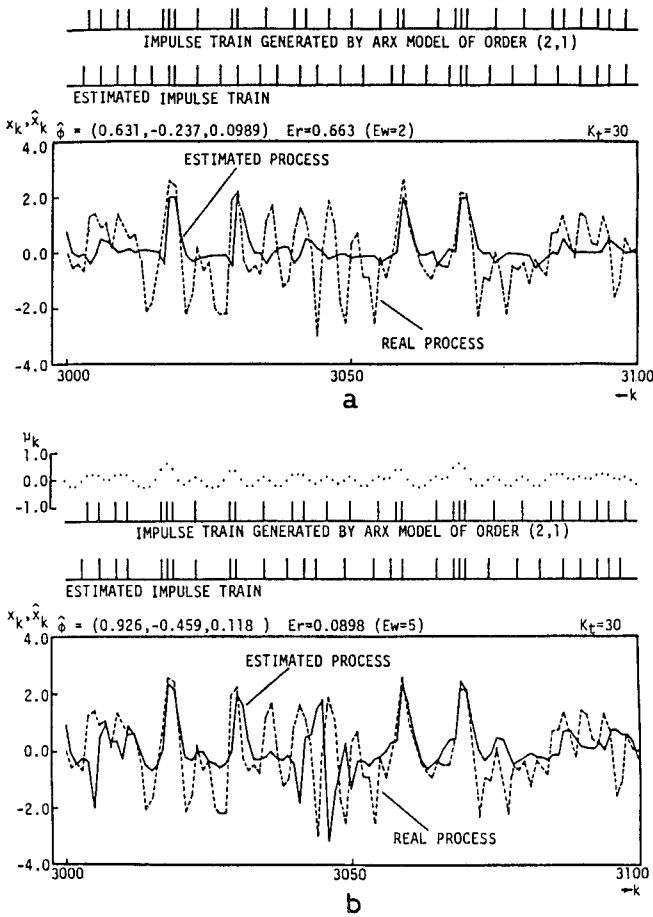


図3 神経システム系過程推定例  
(計算機シミュレーション)

- a 系過程のランダム欠損データのみに基づく推定
- b インパルス系列の時系列情報を併せて観測する推定

次いで閾値時間関数の観測装置としての不完全性がARXパラメータの漸近的偏位性をもたらすことを確率的な議論により明らかにした。さらに、このような推定量の偏位性が神経インパルス時系列の時間的構造に依存することを示した。又、解析手法の生理学的・工学的応用についてもその可能性について論じた。

## 第6章 結 論

本論文では神経システムの出力系列として神経インパルス系列を把え、その動特性に内在する不確定性を解析する手法を確立し、その有効性について検討した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

神経系の情報処理機構が有する種々の優れた機能は、これを構成する神経システムによって実現されている。しかし、神経システムには不確定要素が多く、それを考慮に入れた動特性の研究はほとんどなされていない。著者は、不確定要素の多い神経システムの動特性を解明することを目的として、確率システム論に基づいた新しい解析手法について研究した。本論文は、その成果をまとめたもので全文6章より成る。

第1章は緒論であり、本研究の背景と目的について述べている。

第2章では、本研究の対象とする神経システムを確率システムとしてみたときの性質を明らかにしている。

第3章では、神経インパルス時系列を神経システムの動特性を反映した確率点過程として扱え、神経システムのモデル化の手法について述べるとともに、モデルのパラメータを決定するアルゴリズムを与え、その有効性を計算機シミュレーションにより確認している。

第4章では、前章で得た神経システムモデルの構成要素である 値時間関数が、この動的システムを観測する役割を果していることを示し、確率システム論に基づいて神経インパルス時系列からその動特性を同定する手法を与えている。この手法に従えば、神経インパルス時系列から実時間処理で動特性を推定することが可能である。これは本論文の重要な成果である。

第5章では、前章までに得られた動特性推定の手法を、実際の神経インパルス時系列に適用した結果について述べている。即ち、ネコの網膜神経節細胞より誘導したインパルス系列へ適用し、本手法が有効に機能し十分に動特性の推定が可能であることを示している。また、実際に得られる神経インパルス時系列データとモデルから得られたインパルス時系列の比較により、本手法の適用限界を理論的に検討している。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は不確定要素を考慮して、神経インパルス時系列から神経システムの動特性を推定する手法を考案し、計算機シミュレーション及び実データへの適用とによって、その有効性及び適用範囲を明確にしたもので、生体工学及び情報工学の発展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。