

博士(工学) 佐藤省三

学位論文題名

切換え入力によって励起される
ニューロダイナミクスの非線形動力学的研究

学位論文内容の要旨

脳はニューロンと呼ばれる非線形素子が相互に結合したネットワークのダイナミクスとして機能を発現している。即ち、ニューロン間の相互作用により時間発展する力学系である。また、脳は全体として常に五感からの入力を受け、脳を構成する機能単位一つを見ても相互に結合され、入出力の授受があり単独な閉じた系と捉えることができない。即ち、外部入力の存在する開放系として理解する必要がある。脳を初めとした生態系に限らず、進化のシステム、経済システム、気象システム等の従来の閉鎖系、平衡系の枠組みでは扱えないシステムに対する理論の要求が高まっている。制御、パターン認識などの工学分野においても平衡状態の応用や静的な対応付けの限界からダイナミクスの取り扱いを問題にし始めている。よく知られているように、周期入力により駆動される散逸系であれば、その挙動は時間無限大の下でアトラクタに収束するが、より複雑な外部入力を受ける系は従来の力学系の枠組みでは取り扱えず、理論的基礎そのものが研究対象になっている。

本研究は、確率的切換えを伴う外部入力によって励起されるニューロダイナミクスについて非線形動力学系の観点より実験的考察を行い、力学系の新しいクラスとしての脳の解明を視野に入れた、包括的な理解の枠組みの構築を目標とした。ニューロダイナミクスとして常微分方程式で記述される連続時間リカレントニューラルネットワーク(RNN)を基に計算機実験による検証によって、以下の成果を得た。

RNNに与えられる入出力関係と外部入力をパラメータとした分岐構造の対応付けを可能とした。この結果、RNNの学習における分岐構造の調節としての理解、および未学習パターン入力に対するロバストな入出力変換を実現するための重要な知見を得た。

また、切換え入力に対するニューロダイナミクスはフラクタル構造を持つ軌道集合上の遷移であるフラクタル遷移として特徴付けられることを明らかにした。このことから、RNNの学習過程がフラクタル次元の縮小過程として、また入力ノイズの影響が次元の増加として特徴付けされることを示した。

更に、強制振動子系におけるフラクタル遷移の存在を明らかにした。この結果により、フラクタル遷移が散逸系に普遍な現象である可能性が示された。

本論文は全8章から構成されている。

第1章では、本研究の背景および目的を述べる。

第2章では、実験的考察のための理論的準備を行った。Gohara & Okuyama の切換え入力により励起される散逸力学系に対する理論を、力学系として一般化された連続時間 RNN に適用し、そのダイナミクスを解析するための枠組みを構築した。この帰結として、入力集合によって定義されるベクトル場の集合に対するダイナミクスの取扱いが重要であることが示された。

第3章では、RNN により入出力関係を実現するための教師あり学習法について体系付けを行い、確率的に切り換える外部入力を持つ連続時間 RNN に有効な学習法を考察した。

第4章では、外部入力をパラメータとした分岐を導入することで、入力切換えに対するニューロダイナミクスを検証した。この結果、所望の入出力関係が実現された後のニューロダイナミクスは、近似的に分岐図上の遷移として理解できることが分かった。更に、実験例において与えられた入出力関係がサドル・ノード分岐として自己組織化されていることを明らかにした。学習と分岐の関係を調べた結果、学習は分岐図を学習点に合わせる過程と考えられることを示した。また、入力パターンに付加されたノイズに対して、ロバストな入出力変換を構築するためには不要な分岐構造を除くことが重要であることを示し、このことがノイズパターンを含む学習によって可能であることを指摘した。

第5章では、励起アトラクタ間の遷移ダイナミクスに着目し、フラクタル遷移の観点からニューロダイナミクスを考察した。これにより、軌道はフラクタル集合上を遷移し、軌道の構造は入力の履歴を持つクラスタで構成される階層構造として表されることが明らかになった。学習過程は各クラスタの広がりを縮小していく過程であることを示し、フラクタル次元によって定量化することでこの過程が次元の調節過程と考えられることを示した。また、入力パターンに重畠されるノイズのダイナミクスへの影響は細かいクラスタを埋め尽くすことでフラクタルの階層構造を破壊し、ノイズの影響はフラクタル次元の増加として定量化できることを示した。

第6章では、散逸系に共通の現象と考えられるフラクタル遷移の検証の観点から、ノイズ等の影響を受ける物理系の一例としての強制振動子系ダイナミクスを解析した。この結果、計算機シミュレーションとの比較より現実の物理系でも同様のフラクタル構造が現れることを示し、この系においてフラクタル遷移が存在することを明らかにした。

第7章では、連続時間 RNN の時空間パターン変換能力を、複雑な時間構造を持つ音声波形を入力パターンの例として検証した。この結果、ネットワークが示した高い時系列パターン変換能力が実用規模の問題に広く応用できる可能性を示した。また、所望の入出力変換を満たした後のニューロダイナミクスの解析により、外界で規定された入力パターンのカテゴリが励起アトラクタの幾何学的構造に反映されていることが分かった。そして、この現象が入力をパラメータとした分岐による自己組織化によって定性的に説明できることを示した。

第8章では本研究の総括を行う。

学位論文審査の要旨

主　査　教　授　前　晋　爾

副　査　教　授　堤　耀　廣

副　査　助教授　郷　原　一　寿

副　査　教　授　西　浦　廉　政（電子科学研究所）

学　位　論　文　題　名

切換え入力によって励起される

ニューロダイナミクスの非線形動力学的研究

近年、脳の研究は種々の測定装置の発達により、神経回路網の時間発展に関する膨大な実験データが蓄積されてきており、ダイナミクスに関心が集まり始めている。しかし、神経回路網はニューロンと呼ばれる基本素子が相互に多数結合して全体を構成しており、非線形、非平衡な多体系の集団現象を問題にする必要がある。そのため、ダイナミクスに関する膨大な実験データにも関わらず、回路網の動作・機能に関する理解が進んでいないのが現状である。

本論文では、フィードバック結合を有する連続時間リカレントニューラルネットワーク (RNN) の動作について、非線形動力学系の観点から、主に計算機による数値解析を進め、神経回路網の動作に関する新たな知見を得た。

RNN に与えられる入出力関係と外部入力をパラメータとした分岐構造の対応付けを可能とした。この結果、RNN の学習が分岐構造の調節過程として理解できることを明らかにし、未学習パターン入力に対するロバストな入出力変換を実現するための重要な知見を得た。

また、切換え入力に対するニューロダイナミクスはフラクタル構造を持つ軌道集合上の遷移であるフラクタル遷移として特徴付けられることを明らかにした。このことから、RNN の学習過程がフラクタル次元の縮小過程として、また入力ノイズの影響が次元の増加として特徴付けられることを示した。

更に、強制振動子系におけるフラクタル遷移の存在を明らかにした。この結果により、フラクタル遷移が散逸系に普遍的な現象である可能性が示された。

本論文は、ニューロダイナミクスモデルとしての連続時間 RNN を非線形動力学的観点から考察を行った成果を述べたものである。

本論文は全 8 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の背景および目的を述べる。

第 2 章では、切換え入力により励起される散逸力学系に対する一般的な理論を、連続時間 RNN に適用した、ニューロダイナミクスを解析するための枠組みの理論的考察を述べる。その結果として、入力集合によって規定されるベクトル場の集合を考慮することがニューロダイ

ナミクスの理解に不可欠であることを示した。

第3章では、RNNにより入出力関係を実現するための教師あり学習法について体系的に述べる。この結果として、確率的に切り換えられる外部入力を持つ連続時間RNNに有効な学習法を導出した。

第4章では、外部入力をパラメータとした分岐の導入による、入力切換えに対するニューロダイナミクスの考察について述べる。この結果、所望の入出力関係が実現された後のニューロダイナミクスは、近似的に分岐図上の遷移として理解できることが分かった。更に、入出力関係がサドル・ノード分岐として実現されていることを明らかにした。また、ノイズと分岐との関係を考察し、ニューロダイナミクスの安定性に関する新たな知見を得た。

第5章では、励起アトラクタ間の遷移ダイナミクスに着目した、ニューロダイナミクスの数値実験的考察を述べる。これにより、状態空間の軌道の束がフラクタルで特徴付けられることを示し、入力の履歴がフラクタルな階層構造として状態空間に埋め込まれていることを明らかにした。

第6章では、神経回路網モデルで明らかとなった現象が、常微分方程式で表される散逸力学系に普遍的に見られる現象であることを具体的な物理実験によって検証している。この結果、本論文で明らかにしたことが神経回路網に限らず、応用物理学で問題にされる種々の多体系の集団現象として一般的に見られるものであることが分かった。

第7章では、複雑な時間構造を持つ音声波形を入力パターンの例とした、連続時間RNNの時空間パターン変換能力の実験的検証について述べる。この結果、ネットワークが示した高いパターン変換能力が実用規模の問題に広く応用できる可能性を示した。また、時系列信号が状態空間においてアトラクタの幾何学的構造に反映されていることを明らかにした。

第8章では本研究の総括を行う。

これを要するに、著者は入力の確率的切換えに対する拡張された非線形動力学系の観点からニューロダイナミクスの実験的考察を行い、非線形、非平衡なニューロダイナミクスに関する基本原理の一端を明らかにしたものである。この知見は、脳の基本的機能の解明に貢献するとともに、非線形動力学、応用物理学の発展に寄与するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。