

氏名(本籍)	本 堂 毅 (宮城県)
学位の種類	博士(情報科学)
学位記番号	情博第2号
学位授与年月日	平成6年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院情報科学研究科(博士課程)システム情報科学専攻
学位論文題目	人工神経回路網によるカオス時系列の学習過程の研究
論文審査委員	(主査) 東北大学教授 澤田 康次 東北大学教授 山本 光璋 東北大学教授 阿曾 弘具

## 論文内容要旨

### 第1章 序 論

人間をはじめ生物は、外界の複雑な情報を自己組織的に学習(特徴抽出)することが出来る。この柔軟な情報処理能力を理解するために、人工神経回路網を用いた数理科学的アプローチが現在に盛んに行われている。しかしながら、旧来の人工神経回路網研究の多くは、学習の動的な側面に現れる普遍性を十分に議論することなく、その静的な性質を多く議論するに留まっていた。また、回路網の構造に対して一様性を仮定し、議論を簡単にすることも多く行われて来た。しかし、全ての実在する系は本質的に有限時間で発展し、その構造も一般に非一様であり階層性が現れることも少なくない。本章では、これまでの神経回路網に対する数理的議論の理論的枠組を検討し、その問題点を指摘することにより、学習を理解するためにはその動力学を議論することが重要であることを述べている。

### 第2章 人工神経回路網によるカオス時系列の学習 — 概論 —

これまでの人工神経回路網の理論を概観すると同時に、学習対象であると同時に研究方法のプロトタイプとしての役割を果たすカオス時系列について概観し、本研究の方法づけを議論している。

### 第3章 人工神経回路網によるカオス時系列の学習過程とその解析

本章では、学習過程にみられる普遍性を理解するため、バックプロパゲーションアルゴリズムを用いた階層型神経回路網モデルによる、カオス時系列(テントマップカオス)の逐次的学習過程を数値実験を通して詳細に解析した。旧来の研究に於いては、学習過程の進行の様子は平均自乗誤差の時間発展によってのみ記述されることが多かった。しかるに、人工神経回路網の時間発展は、その結合荷重ベクトルの変化によって担われるため、学習過程の完全な記述のためには、この荷重ベクトルの時間発展に対する理解が不可欠である。そこで、荷重ベクトルの時間発展を記述する(規格化された)メジャーを新しく定義し、荷重ベクトルの時間発展に見られる普遍性を議論した。

学習は多くの場合不連続的に進む。すなわち、系が時系列の特徴を抽出する前後で荷重ベクトルは急激な動きを示す。しかし、この前後で、各時刻毎の荷重ベクトルの変化量の増加は見られない。そこで、荷重ベクトルの変化方向の秩序を測る新しいメジャーとしてコヒーレンスを定義し、荷重ベクトルの急激な動きの原因がその(逐次的に)動く方向に秩序が発生することにあることを明らかとした(図1a)。また、荷重ベクトルの動きを特徴づける第2のメジャーとして有効学習新高度を定義し、荷重ベクトルの急激な変化が起こるときには、荷重ベクトルは高次元的な動きをするこ

とを明らかにした (図 1 b)。コヒーレンス解析で見出された秩序の出現と有効学習進行度解析で見出された多様性の出現は一見矛盾して見えるが、荷重空間の次元が (一般に) 高いことを考えると両立し得ることが解る。荷重空間で螺旋状の動きが生じていると考えればよい。

#### 第 4 章 人工神経回路網に見られる学習過程の普遍性

前章で得られた結果が時系列の学習に限られず、関数学習をも含め、学習対象やネットワークの構造、初期状態等の広い範囲で共通であることを多くの数値実験を通して明らかにした。

また、学習過程においては、結合荷重の初期値設定問題において最適とされている荷重範囲 (活性領域) を系自らが見つけ出していることを明らかにした。従って、一度学習環境下に置かれたネットワークは結合荷重が活性領域に近づいている (あるいは入っている) と考えられ、変化する外界に対して柔軟な適応能力を持っているものと考えられる。

#### 第 5 章 入力信号の短時間相関と学習能力の一般的関連

本章では、はじめに、力学時系列学習の収束性が乱数を入力して用いた同じ入出力写像の関数学習の収束性と異なる場合があることを示した。テントマップ時系列の学習に於いては、入力時系列は一様乱数と同じフーリエスペクトル、振幅、確率密度を持つ場合があるが、この場合でも収束性の差異は残るのである。この比較実験から、収束性の違いが、カオス時系列の持つ入力パターンの (短時間) 相関にあることが明らかとなった。

次に、逐次学習法がいわゆるセルフ・アニーリングの性質を内在することに言及し、カオス時系列の持つ短時間相関が学習を促進する性質を内在していることを明らかにすることにより、上に見られる収束性の違いを説明した。入出力パターンを全て記憶してから学習を行うアルゴリズムや解析ではこの内在された特性は損なわれてしまう。従って、第 3 章で得られた荷重空間のダイナミックスの理解が重要であることが解る。

学習以外にも本研究で明らかにされたカオスの持つ短時間相関が系の時間発展に大きく影響する例として、カオスニューラスネットワークが存在する。これらの系に共通する特徴は多重安定性である。そこで、簡単な多重安定系にカオスノイズを加える数値実験を行った。その結果、カオスノイズはそのフーリエスペクトルがホワイトであっても確率的ランダムノイズとは全く異なった現象 (ポテンシャル障壁の高い透過性や対称性の破壊) を生むことを発見した (図 2)。これはカオスの多重安定系に於ける役割を示す最も単純な例となっており、カオスニューラスネットワークに現れる多様な現象を理解する鍵となる。このため、カオスノイズ (の短時間相関) が多重安定系で多様な現象を示す理由を議論した。カオスノイズが多重安定系で起こす対称性の破れ等の原因は、カオス時系列を生成するマップの不安定平衡点の性質によるものであり、これを評価することにより、カオスノイズが加わった多重安定系に於けるポテンシャル障壁透過確率が解析的に評価出来る。この理論値をシミュレーション値と比較することにより、この理解が正しいことを確かめた。不安定平衡点への絡みつきが系の時間発展を大きく左右する原因は、第 1 章で議論した、系の発展が本質的に有限時間でなされることにある。

最後に、短時間相関という視点を通して学習力学や一般の力学系のダイナミックスを理解する可能性を議論した。これは、今後の情報物理学における多重安定系 (複雑系) の研究への展望を与えるものである。

#### 第 6 章 結 論

結論である。

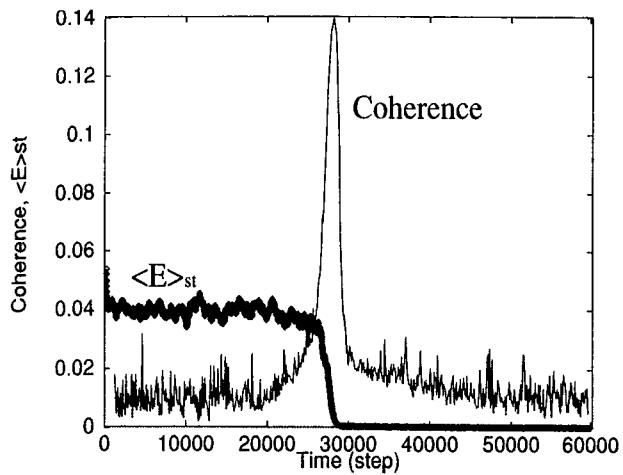


図 1 a : コヒーレンス (coherence) — と  
平均自乗誤差  $\langle E \rangle_{st}$  の時間発展の典型例

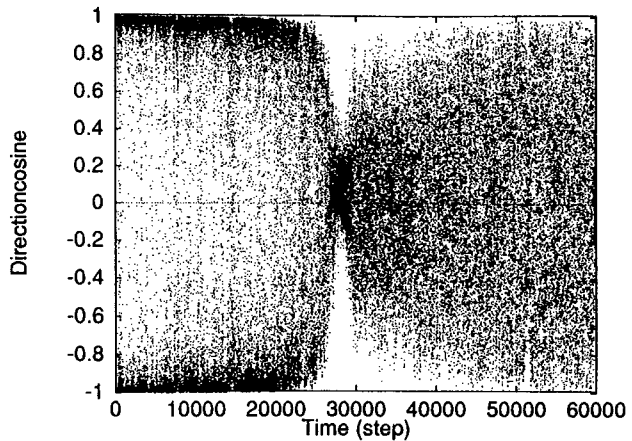


図 1 b : 各入力に対する有効学習進行度  
(Direction-cosine) の時間発展の典型例

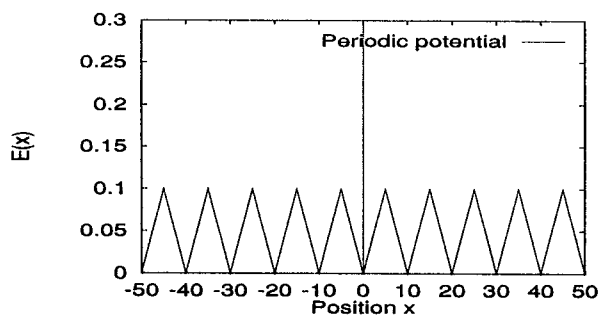


図 2 a : 最も単純な多重安定系  
: 1次元周期ポテンシャル

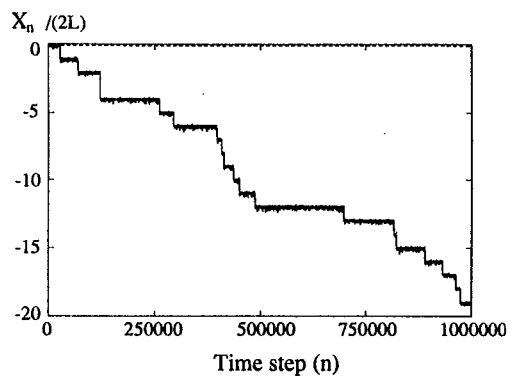


図 2 b : 図 2 a ポテンシャル中でテントマップカオスの発生するホワイトノイズを受けた場合の粒子 ( $X_n$ ) の時間発展 (典型例)。縦座標はポテンシャル時期  $2L$  で規格化してある。

## 審査結果の要旨

生物がその情報処理システムとして進化の過程で発達させた神経回路網は、その高度に知的な処理能力のために新しいタイプの計算機として利用する研究が進んでいる。しかるに、神経回路網の特徴である可塑性による外部情報の学習ダイナミクスには未知な点が多く、学習の効率化の要請からその解明が待たれている。本論文は、カオスに代表される複雑な時系列の、階層型神経回路網による学習過程を詳細に調べた研究成果を纏めたもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、カオス時系列の持つ複雑さと、神経回路網による学習過程のこれまでの研究の問題点について述べている。

第3章と第4章では、テントマップが作る時系列学習において学習が急速に進む臨海時間が存在することを見いだしたこと、また、そのことが神経回路網の構造やマップによらず一般的であることを記している。更に、学習に伴う神経回路網の荷重空間における運動を特徴づけるコヒーレンスおよび有効学習度を定義し、これらの量の測定から学習臨界時間において運動が一挙に他次元的になると同時にマクロになること等を示したことは評価できる。

第5章では、カオスマップが作る時系列を入力にする場合と、乱数を入力にして同じマップを学習する場合とを比較し、前者の学習時間が後者のそれより速いことに気付き、その原因がカオス入力の持つ短時間相関によることを記している。

更に、もっと一般に多重安定系においてローカルミニマムから脱出させるためには、不安定平衡点付近において強い相関を持つカオス入力があること、また、非対称な不安定平衡点を持つテントマップカオスは、一様乱数と同じ普遍密度、スペクトル、自己相関関数を持っているにもかかわらず、多重安定系を一方にドリフトさせる意外な事実を発見したことは高く評価できる。

第6章は、結論である。

以上要するに、本論文は神経回路網の学習過程を詳細に調べ、その特徴づけを行い、カオスの持つ短時間相関が学習および最適化問題におけるローカルミニマムからの脱出に有効であること等の新しい有用な知見を示したもので、情報物理学の進展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（情報科学）の学位論文として合格と認める。