

論文の内容の要旨

論文題目 自律的に学習する高次元力学系の構成論的研究

氏名 井上 克馬

生物のように適応的かつ頑健に振る舞える知的システムは、高度な自律性と学習機能を兼ね備えている。そのようなシステムはまず外部からの介入が存在し続ける状況下でも常に自発的に活動し、絶え間なく学習しながら振る舞いを獲得し続ける。また学習する対象を外部の環境から自ら選択するのみならず、ときにシステムの内的な状態から構成できる。そしてその学習機能は、脳や神経系のようにある複雑な相互作用の中で一貫して実現される。このような「自律的な学習機能」は生物知能の重要な特徴の一つであり、かつ現在の人工知能では十分に達成されていない。

本論文では、より高度な人工知能の実現に向けて、脳・身体における多数の要素の相互作用を抽象化した高次元非線形力学系の上で、自律的な学習機能が実現された数理モデルの設計論を提案した。そして構成された数理モデル、すなわち「自律的な学習システム」の解析を通して、自律的な学習機能の背後に通底する普遍的な制約条件の理解を目指した。本論文は全8章から構成される。各章の概要を以下に示す。

第1章では、生物知能が有する自律性の重要な特徴として適応性と自己同一性を挙げ、その構成を目指したこれまでのシステム論的アプローチの歴史を概観した。そして既存の人工知能において自律的な学習機能が十分に実現されておらず、結果的に生物知能が有するようしなやかな振る舞いが達成されていないことを指摘した。それらを踏まえ、これまでのシステム論的アプローチの延長として、自律的な学習システムの構成を通し

て、自律的な学習機能の背後に通底する動的特性の解明を目指す構成論的研究を本論文の主題に設定した。特に生物知能と既存の人工知能の比較を通して、「自発性」、「学習対象の自己決定・構成能」、および「学習機構の自己充足性」の3点を自律的な学習システムが満たすべき要件として導入した。また高次元非線形力学系として構築されて初めて、本論文が目指す力学系的特性の解析が可能になるだけでなく、構成の制約に由来する副次的な効果もたらされることを指摘し、本論文で採用される構成論的アプローチの意義を議論した。

第2章では、自律的な学習機能を部分的に実現した既存の数理モデルとしてInnate Training (以下IT) を導入し、その特性を議論した。また並行してRC (Reservoir Computing) , ESN (Echo State Network) , RLS (Recursive Least Squares) アルゴリズム等、以降共通して現れる重要な概念と手法を説明し、それらの定式化を行った。その上でITがそのままでは第1章で導入された自律的な学習システムの要件を完全には満たさないことを指摘し、ITを基軸に自律的な学習システムの構成のための4点の改善点と、各々に対応する研究の指針を策定した。具体的には (1) ITで使用される入力時系列が外的な機構で生成・保持されている点、(2) ITで与えられる入力設計者によって外的に切り替えられている点、(3) ITの学習アルゴリズムであるRLSアルゴリズムが、高次元カオス力学系とは独立に計算される点、(4) ITで使用される教師軌道のハイパーパラメータが設計者によって決定される点、を既存のITの改善点として指摘した。

第3章では、Input Reservoir (以下IR) と呼ばれる概念を提案し、ITで与えられる過渡的入力を非カオス的なESNの緩和過程としてモデル化し、その上でIRとして高次元非線形力学系の部分系として内在化させた。このIRは、学習システムの外部にある機構を部分系として内包させる着想を与えるため、学習システムの自己充足的な構成を実現する上で重要な役割を果たす。またESN として表現された過渡的入力の性質と、ITの学習性能の関係を調査し、長い時定数で特徴づけられる過渡的時系列がITの学習を促進することを示した。加えてIRの概念を適用し、生物の身体においてみられる柔軟な要素が有する計算論的な機能性を検証した。特に脳・神経系が皮膚や筋肉等の柔軟な要素に覆われる生物の普遍的な構成に着目し、そのような構成が脳・神経系をモデル化した高次元カオス力学系の時間的情報処理能力の向上に寄与していることを示した。

第4章では、ITでは設計者によって制御される入力の生成および切り替えを、IRならびに系が生成する高次元カオス軌道を活用し、閉ループを介して高い操作性で設計する手法を提案した。この提案手法を駆使することで、設計者からの一定の制御不能性、すなわち独立性が担保された、入力の生成および切り替えの自発的な構成が実現される。またこの提案手法は、従来はその制御困難性より忌避されてきた高次元カオスを、自発性の駆動要因ならびに計算資源として積極的に活用する構成を採用しており、高次元カオスが持つ情報処理の新しい側面に光を当てている。

第5章では、All-In-One Reservoir (以下AIOR) と呼ばれる概念とNeuralizingと名付

けられる手法を提案し、その二つを統合することで一貫した高次元非線形力学系の中でITの学習メカニズムが内包されたNeuralized All-In-One Reservoir（以下NAIOR）の構成法を提案した。このNAIORは一般的な機械学習モデルとは異なり学習部と被学習部が、同一の系のダイナミクスの上で表現されるため、両者の明示的な分離が克服された学習システムの構成が実現されている。その結果、潜在していた両者間の相互作用により計算資源の割り当てが、動的に変化しうるということがここでは明らかとなった。

第6章では、ITにおいて設計者によって制御される教師信号の生成・保持機構そのものが系内部のダイナミクスに置換されたDevelopmental Innate Training（以下DIT）と呼称される構成を提唱した。そしてその基本単位として二つのサブモジュール間の関係で特徴づけられる双方向DITならびに片方向DITに着目した。その結果IRとしてカオス力学系が片方向的に投射される片方向DITの構成において、DITがITと同様の学習特性を有することを示した。この片方向DITは、ITとは異なり、教師軌道が動的に変化し常に誤差が発生する構成であり、誤差の最小化に限定されない学習システムの新しい形態を提示している。さらにDITの解析を通し、恒常的に学習の進行と崩壊が繰り返される自己組織的臨界現象状のダイナミクスが観測されることを示した。これらの結果はIRとしてカオス的な部分系が内包される構成が、恒常的な学習機能の成立において重要であることを意味し、自律的な学習機能が要請するトポロジーに関する制約の存在を示唆する。

第7章では、ここまで提案されたIR, AIOR, Neuralizing, およびDITを統合・駆使し、自律的な学習機能がニューラルネットワークのダイナミクスの上で実現された「統合学習システム」を構成した。そして得られた統合学習システムが、第1章で導入された自律的な学習機能の要件を満足する自律的な学習システムであることを議論した。まず得られた統合学習システムは、IRとしてカオス的なESNを内包し教師軌道を生成し続けるので自発的である。またDITとの統合によって、ITで見られた設計者による教師軌道の初期値の選定が、高次元非線形力学系内のダイナミクスに置き換えられ、学習対象に対する自己決定・構成能を有している。さらにNeuralizingの活用によってRLSアルゴリズム等、ITでは外的な機構として計算された学習メカニズムが、全て高次元非線形力学系内で一貫して表現されており自己充足的である。またAIORの着想を応用し、構成された統合学習システムのダイナミクスを計算資源として活用することで、学習機能を損なわずに次元を削減できることを示した。この操作は、統合されて初めて可能となるもので、本研究で得られた設計論の有効性を示すとともに、次元削減の操作を駆使し、統合学習システムのより洗練された構成が今後研究されることが期待される。

第8章では、ここまでの設計論と結果を総括し、得られた知見とその意義を論じた。また構築された高次元非線形力学系に関して、その解析および応用の具体的な指針を今後の研究の展望として議論した。このように本論文は、自律的な学習機能の構成論的研究を主題として、既存の機械学習の枠組みを大きく拡張する結果を得た。特に学習過程を、推論モデル上のパラメータ調整とみなす従来の観点と大きく異なり、高次元のダイ

ナミクスとして取り扱うことで, 学習過程に対する新たな数理的アプローチを開拓した. さらに本論文で得られた設計論は, 計算機上の数理モデルにとどまらず, 物理系一般に適用可能である. この汎用性を活用し, 実世界上でその環境との相互作用を通して学習する物質やロボットの実装に関する研究が今後展開されるものと期待される.