

審査の結果の要旨

氏名 井上 克馬

本論文は「自律的に学習する高次元力学系の構成論的研究」と題し、生物知能の重要な特徴の一つであり、現在の人工知能で十分達成されていない「自律的な学習機能」に焦点をあて、これを脳・身体における多数の要素が相互作用しつつ時間発展する系を抽象化した高次元非線形力学系の上で実現し、その動的特性の解明を目論む構成論的研究をまとめたもので、全8章から構成される。

第1章ではより高度な人工知能の実現に向けて「自律的な学習機能」を兼ね備えた数理モデル、すなわち「自律的な学習システム」の設計論の構築とその原理の理解が論文の目的として設定される。特に生物知能との比較を通して「自発性」、「学習対象の自己決定・構成能」、ならびに「学習機構の自己充足性」の3点の特性が自律的な学習システムが満たすべき要件として導入される。

第2章では、この3点の要件を部分的に満足する既存の数理モデルである Innate Training (以下IT) と呼ばれる高次元カオス力学系を積極的に活用する機械学習手法が導入され、その特色が議論される。そして自律的な学習システム実現に向けた4項目の改善点が策定され各々に対してITの拡張の指針が提示される。以下3-6章はこの4項目に対応する。

第3章ではInput Reservoir (以下IR) と呼ばれる概念が提唱され、ITにおいて重要な役割を果たす過渡的入力での学習における効果が検証された上で、その生成機構がIRとして高次元非線形力学系内の部分系として表現される。このIRは、外的な機構をIRとして系に内在化させる着想を与え、学習システムの表現の一貫性の向上に寄与する。

第4章では、ITにおいて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、線形閉ループを介して高い操作性で設計する手法が提案される。この提案手法を駆使し、設計者からの一定の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可能となる。

第5章では、All-In-One Reservoir (以下AIOR) と呼ばれる概念とNeuralizingと呼ばれる手法が提案される。これらを統合しITの学習機構、すなわちRLS(Recursive Least Squares)アルゴリズムと可変線形結合が内包されたニューラルネットワークであるNeuralized All-In-One Reservoir (以下NAIOR)の構成方法が提案される。このNAIORは、その学習機能が学習部と被学習部の乖離なく一体としてニューラルネットワーク上で実現された高次元非線形力学系であり、学習システムの自己充足的な構成を実現している。

第6章では、設計者によって制御される教師軌道の生成・保持機構そのものが系内部の状態変化、すなわちダイナミクスによって構成される形でITが拡張された

Developmental Innate Training（以下DIT）と呼ばれる構成が提唱される。そしてカオス力学系がIRとして片方向的に結合する構成において、ITと同様の学習効果が確認されるのみならず、恒常的に学習の進行と崩壊が繰り返される自己組織化臨界現象状の遷移が観測されることが示される。

第7章では、ここまでのIR, Neuralizing, およびDITを統合し、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上で表現される「統合学習システム」が設計され、冒頭で定義された要件に関してその妥当性が検証される。またAIORの発想を応用し、そのダイナミクスが計算資源として活用されることで、学習機能を損なわずに次元の削減が試みられ、その構成の自己充足性がより洗練される。

第8章では、以上が統括され、自律的な学習機能を有する高次元非線形力学系の設計論が構築されたと結論づけられている。また得られた数理モデルの自律的学習システムとしての妥当性、ならびに手法の統合の有効性が主張されている。

以上、これを要するに、本論文は、生物知能の重要な特徴でありかつ現在の人工知能で十分に達成されていない自律的な学習機能に注目し、Innate Trainingと呼ばれる高次元カオス力学系を積極的に活用する既存機械学習手法の拡張を通し、自律的な学習機能を有する高次元非線形力学系の設計論を構築している。その設計論に基づき得られた自律的な学習システムの力学系特性の解析を通して、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解明と、より高度な自律性を有する人工知能の実現への新たな道を拓いたと言える。さらに抽象的な計算モデルにとどまらず、ニューロモーフィックデバイスの実装やロボットを介した記号獲得システム等、実環境上での実装・運用の幅広いシナリオを提示しており、知能機械情報学に貢献するところ少なくない。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。