

学位論文題名

Studies on Inductive Learning Theories for Real World Computing

(実世界計算のための帰納的学習理論に関する研究)

学位論文内容の要旨

現在、情報処理に関する研究領域の大きな関心の一つはいかに実世界の種々の問題に対して、情報処理を実行するか、すなわち、実世界計算(Real World Computing: RWC)問題である。ここで、情報処理に要求される機能は時変性、あいまいさ、雑音などの不確定性を含む問題の解決機能であり、そのメカニズムの展開が急務である。RWCは通商産業省の大型研究プロジェクトとして研究遂行中の課題であり、第6世代コンピュータの到達目標と位置付けられている。従来、RWCの問題に対しては、適応と学習の機能を有する情報処理法が有効とされ、文部省重点領域研究などにおいても、特定のロボット制御問題や組み合わせ最適化の問題などに対してその可能性が示されつつある。しかしながら、実世界における問題のクラスは、制御目標や最適化対象が陽に記述されない場合がより一般的であり、これらに対しては、まだ有効な方法論の提案はなされていないのが現状である。

本研究は実世界計算の問題に対して、情報処理機構そのものが試行錯誤と経験により、問題解決の方針を自律的に発見するような新しい方法論を模索したものであり、これを基にした適応的帰納学習理論を構築し、種々の応用問題への適用を通して、構築した理論の有用性と妥当性を検証した成果をまとめたものである。論文は3章より構成されており、以下にその概略を示す。

第1章は本研究の背景、目的、課題について論じ、帰納学習をRWCにおいて適用可能とするための原理を導いている。そこでは、まず、実世界計算を実現する際の帰納学習法の有用性及び、妥当性を論じている。次に、従来の帰納学習の内包する三つの問題として、対象環境の理想化に起因する実世界問題への適用の困難性、数理論理学における記号表現系に立脚する故の柔軟性の欠如、及び、教師に依存した学習を挙げ、従来の帰納学習に欠落する機能として「適応」機能に着目して、RWCに適用可能な帰納学習法構築における「適応」をキーワードとして導かれた六つの基本原理(6原理)を提案している。すなわち、経験からの学習には、1.柔軟性、2.自律性、3.反射性、4.省資源性、5.学習性、6.分散性が不可欠であるとの6原理である。

第2章は前章に提案した6原理に基づいたRWCのための帰納学習法の実現について論じている。本章は以下に示す7節から構成され、それぞれ、具体的な帰納学習法における問題点を克服した方法論の提案を行っている。

第1節では、まず「実例からの学習」を実現した代表的な学習法である実例に含まれる情報の期待値を表わす情報エントロピー量に基づき、学習すべき概念を表現する決定木を獲得する手法としてよく知られるID3のRWCへの適用問題を論じている。通常ID3は過分叉問題と適応性の欠如のために、直接RWCにこれを導入することは不可能となることを指摘した上で、本問題領域において上述の六つの原理を具現化するための新しい方法論GA-BDTを提案している。GA-BDTは適応探索手法である遺伝アルゴリズムを用い、情報量基準に基づく評価関数によって、二元決定木空間探索を行い、有効な決定木を生成する手法であることから、生成された決定木によって記述されたルール群は第3章で示されるように実世界に適用可能であり、本手法が目的とする帰納学習であると主張している。

第2節では、マルチエージェント系を構成する多種エージェント群が互いに独立した多様な行動パターンを要求されるより複雑な環境に対して適応可能な帰納学習法を6原理に基づき、提案している。すなわち、遺伝的プログラミング(GP)を導入することで、環境適応性を保証しつつ、島モデルを導入することでエージェント間の共進化を実現し、各行動パターンの多様性を実現している。また、このような問題に対する評価法についても詳細に検討されている。

第3節から第7節までは、実環境への適応が最も期待される強化学習法を対象とし、6原理に基づいた帰納学習法を提案している。それに際し、まず強化学習を実環境に適用する場合6原理に対して、収束性及び、莫大なメモリ資源の必要性という問題を持つことが導出されている。次に、これら二つの問題点に対して、ラベリングに基づく経験の再利用法とグルーピング法を提案することにより、これらの問題解決が可能であることを明らかにしている。さらに、従来の強化学習においては特に困難な問題とされているエージェント間の相互作用を、従来のエージェントによる学習という立場から離れ、「場による学習」という発想の転換を行うことにより、実現している。これにより、エージェントの情報処理能力の向上、行動の最適化、協調行動の実現が可能であることを論じている。また、最も困難な課題であると考えられる自己評価型学習法であるAHC強化学習構造の問題点を分析し、kohonen ネット、統計的な探索法、及びHeuristics 導入による gradient 推測によって、実問題に適用できる強化学習分類システムを提案している。

第3章は、6節から構成され、各節において第2章に提案した方法論をさまざまな工学的応用問題に実際に適用した場合の有用性を検証することにより、提案原理とそれに基づく方法論を検証している。

第1節では、提案したGA-BDT手法を交通制御問題のモード選択(mode selection)に適用している。交通制御問題は一般に最適化対象が明示されておらず、解決困難な課題であるが、GA-BDT法による適応的に効率的二元決定木の生成により本問題が解決可能であることを明らかにしている。

第2節では、提案手法により完全自動化工場の生産計画を各作業ロボットがbottom-up的に実現し得ることを明らかにしている。このような問題において、各ロボットの最適化対象は明示されておらず、ロボットの行動方針をGPによって生成し、タスクの完成度や消費したエネルギー、経過時間などの要素も総合的に評価することで、柔軟かつ適応性の高い行動パターンが生成できることを論じている。

第3節と第4節では、経路計画の典型的問題として、3自由度の棒の問題と多リンクロボットの制御問題を、ラベリングとグルーピングに基づく強化学習法によって、より少ないメモリで、高速に最適経路の探索ができ、解決できることが示されている。

第5節では、提案した学習的場モデルを典型的な分散処理問題の追跡問題、多自由度リンクの制御問題及び浮遊ロボットへ適用している。これによって、学習適応場モデルの分散情報処理能力が究明されている。

第6節では、提案した強化学習分類システムによって、筋電(EMG)義手制御が実現されている。ここでは、筋電信号の時間的、空間的に相関特性を利用した6原理に基づく強化学習法の適用によって、複雑な、時変的な筋電信号を認識できることが明らかにされている。

第4章は結論を述べたものである。すなわち、本論文は、RWCの問題に適用可能な帰納学習における6原理を提案し、経路計画や生産計画問題等への計算機実験を通して、提案した理論に基づいて構築された情報処理機構それ自体が試行錯誤と経験により、最適な解を自律的に生成可能であること、さらに、他の問題領域分野としての筋電義手の制御問題と浮遊ロボットの運動制御問題への応用実験において、提案した理論が制御目標や最適化対象が陽に記述されないような問題に対しても問題解決の方針を自律的に発見することのできる方法論であることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主査	教授	嘉数 侑 昇
副査	教授	大内 東
副査	教授	宮本 衛 市
副査	教授	和田 充 雄
副査	助教授	横井 浩 史

学位論文題名

Studies on Inductive Learning Theories for Real World Computing

(実世界計算のための帰納的学習理論に関する研究)

近年、実世界の種々の問題の情報処理に関する研究が実世界計算(Real World Computing: RWC)問題として盛んに行われている。実世界での情報処理に要求される機能は時変性、あいまいさ、雑音などの不確定性を含む問題の解決機能であり、そのメカニズムの展開が急務である。従来、RWCの問題に対しては、適応と学習の機能を有する情報処理法が有効とされ、たとえば特定のロボット制御問題や組み合わせ最適化の問題などに対してその可能性が示されつつあるがそれらは問題設定自体明示的に記述可能なものに限定した議論展開が主であった。しかしながら、実世界における問題のクラス、制御目標や最適化対象が陽に記述されない場合がより一般的でありこれらに対してはまだ有効な方法論の提案はなされていないのが現状であり、今後の発展が待たれている状況にある。

本論文はこのような現況にある実世界計算の問題について、情報処理機構そのものが試行錯誤と経験により、問題解決の方針を自律的に発見するような新しい方法論の開発を目的としたものであり、これを基にした適応的帰納学習理論を構築し、種々の応用問題への適用を通して構築した理論の有用性と妥当性を検証した成果をまとめたものである。以下に本研究で得られた6つの成果とその評価を記す。

第一は、従来の帰納学習に欠落する機能として「適応」機能に着目して、RWCに適用可能な帰納学習法構築における「適応」をキーワードとして導かれた六つの基本原理(6原理)を明らかにしている。すなわち、経験からの学習には、1.柔軟性、2.自律性、3.反射性、4.省資源性、5.学習性、6.分散性が不可欠であるとの6原理である。ここに示された「適応」をキーワードとした対象問題のもつ性質の分析と問題解決手法に必要とされる要求機能の基本設計は以下に展開される本研究の根幹をなすものであり、RWCのための機能学習法概念設計へ多くの知見を提供する役割を担うものである。

第二に、実例に含まれる情報の期待値を表わす情報エントロピー量に基づくID3問題領域において新しい方法論GA-BDTを提案している。GA-BDTは適応探索手法であるGAを

用い、情報量基準に基づく評価関数によって、二元決定木空間探索を行い有効な決定木を生成する手法でこのクラスでは強力なRWCツールとなりうる。提案したGA-BDT手法は交通制御問題のモード選択に適用し有用な結果を得ている。

第三に、マルチエージェント系を構成する多種エージェント群が互いに独立した多様な行動パターンを要求される複雑な環境問題クラスに対し、GPを導入して環境適応性を保証しつつ、さらに島モデルを導入することでエージェント間の共進化を実現し各行動パターンの多様性を実現する手法を提案している。提案手法により完全自動化工場の生産計画を各作業ロボットがbottom-up的に作成可能であることを明らかにしている。

第四に、実環境への適応が最も期待される強化学習法をクラスとした場合、そのネックとなっている収束性及び莫大なメモリ資源の必要性という問題に対して、ラベリングに基づく経験の再利用法とグルーピング法を提案している。典型的問題としての経路決定問題を、ラベリングとグルーピングに基づく強化学習法によって、より少ないメモリで、高速に最適経路の探索ができ、解決できることを示している。

第五に、従来の強化学習においては特に困難な問題とされているエージェント間の相互作用を従「場による学習」という発想の転換を行うことにより実現している。これによりエージェントの情報処理能力の向上、行動の最適化、協調行動の実現が可能であることを論じている。提案した学習的場モデルを典型的な分散処理問題の追跡問題、多自由度リンクの制御問題及び浮遊ロボットへ適用し、学習適応場モデルの分散情報処理能力が究明されている。

第六に、自己評価型学習法であるAHC強化学習構造の問題点を分析し、kohonenネット、統計的な探索法、Heuristics導入によるgradient推測の組み合わせによって、実問題に適用できる強化学習分類システムを提案し、筋電(EMG)義手制御を実現している。ここでは、筋電信号の時間的、空間的に相関特性を利用した6原理に基づく強化学習法の適用によって、複雑な、時変的な筋電信号を認識できることを明らかにしている。

これを要するに、著者は、RWC問題に適用可能な解を自律的に生成可能性および問題解決方針の自律的発見性をもつ帰納学習法を提案、検証し、RWC問題に対して新知見を得たものであり、情報工学に対して貢献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。