

論 文 要 旨

論 文 題 目

共適応系における共進化探索に関する研究

A Study on Co-evolutionary Search in Co-adaptation Systems

共適応系とは、進化主体が環境もしくは他の進化主体との相互作用を通して作用対象の特性に応じて自身の特性を適応的に変化させる、という適応的相互作用系の全般を指す。特に、進化主体および環境が相互作用により各々最適化が行われる場合を主体間共適応系とし、環境が最適化される必要のない場合を主体環境共適応系と定義する。実世界における問題の多くは共適応系の性質であり、それらに対する統一的な解法が必要である。近年、生物の進化メカニズムを模倣した進化的計算手法が適応手法として人工知能の分野における問題解決、エージェントの学習などの問題等へ応用されているが、共適応系に対する明快な解決法は十分に議論されていない。

共適応系における進化的計算手法が解決すべき主な課題として以下の2つがある。

- (1) 共適応系の問題に対して動的に有効な適応度を与える枠組みの構築。
- (2) 主体間共適応系の問題において最適解を複数の有効解により構成する枠組みの構築。

進化的計算手法によって最適化問題を解く場合、個体の適応度を決定する適応度関数は問題の目的関数から明示的に定まる。しかしながら、課題(1)の共適応系の問題は、適応度関数の明示的決定が困難であるため、計算過程においてその都度適切な適応度を決定する手段が必要である。課題(2)の主体間共適応系の問題では、進化主体各々が最適化を目指すため、作用対象に対する適切な解が一意に決まらず複数の有効解の組み合わせによって最適化が実現される場合が多い。例えば、2人ゼロ和ゲームの戦略獲得問題は、全対戦相手の戦略に対して対応可能な戦略集合を必要とする。すなわち、相手戦略に応じて有効解が異なるため、問題解決には有効解の集合を獲得しなければならない。

これらの課題に対して本論文では、進化計算の一方法論である共進化計算を用い、共適応系問題の統一的な解法を与えることを目的とする。共進化計算とは、生物種の相互依存進化を模倣した計算論的枠組みの総称である。この枠組みは、生物種間の相互作用によって各々の種が進化することから、共適応系のダイナミクスの計算モデルであるといえる。自然界における共進化の種間関係には、競争・共生・寄生等がある。競争に基づく共進化とは、ある生物に対して優位に立とうとする結果、相互作用に関連している性質が互いに進化する現象である。つまり、具体的な評価に基づいての進化ではなく、他の個体に対し

て自分が優位になる進化の結果互いにより優れた行動を獲得し、系全体としてよりよい形態を形成するメカニズムである。一方、共生は、異なる種が密接な関わりをもち共存する系を指す。この系において、相互に利益を得る関係を相利共生という。このような自然界の諸現象を工学的にモデル化する試みが行われており、その計算モデルが、競合共進化アルゴリズムおよび共生共進化アルゴリズムである。

本研究ではまず、共適応系の問題として2人ゼロ和ゲームを対象とし、競合共進化アルゴリズムが課題(1)の解決手法として動的に適応度を与え解を獲得し得ることを示す。ゲームの最適戦略を獲得する場合には戦略の強さを明示的な評価関数によって決定できないため、対戦相手の戦略との対戦結果のみの情報を用いて戦略を進化・獲得しなければならない。本実験は、全ての対戦相手に対する最適戦略が存在するゲームにおいて、競合共進化アルゴリズムが最適戦略を獲得できることを示す。また、課題(2)を含む問題に対しての適用を行い、既存の競合共進化アルゴリズムに対しても複数の解を集合として獲得する機構を組み込む必要性を述べる。

次に、競合共進化アルゴリズムに有効解の相補性を導出する機構と個体を継続評価する指標を導入することにより課題(2)を解決する、解のパッケージ化法を導入した競合共進化アルゴリズムを提案する。本研究では、解(個体)の集合をパッケージと定義する。提案手法は、問題の最適化に対して必要最小限の個体で構成されるパッケージを獲得する手法である。したがって、問題に対する有効なパッケージは競合結果を補完し合う個体同士(相補的な個体集合)で構成されなければならない。有効なパッケージは、全個体間の競合結果を求めることにより獲得可能であるが、それには膨大な計算コストを要する。提案アルゴリズムでは、各世代の競合結果から相補的な個体集合を生成し、相補関係を維持しつつ個体の追加・削除を逐次的に行うことによってパッケージの再構成を行う。このとき、1世代のみの競合結果に基づく個体の淘汰は、有効なパッケージに必要とされる個体までも淘汰する恐れがある。そこで、個体の継続評価を行うために、各個体に対して、存続可能世代数を示すパラメータ：*life-time*を設定する。したがって、本手法は、局所情報に基づき相補的な個体集合を生成し、*life-time*の設定による個体継続評価、個体淘汰の緩和を行うことによって、競合集団の変化に頑健なパッケージの獲得が期待できる。計算機実験では、適応度関数が明示的に定まらない問題として人工生命の分野で研究されているゲームを取り上げた基礎実験を行う。さらに、比較的解空間の小さい Tic-Tac-Toe ゲームへの適用により実問題における解獲得の性能を評価する。

また、競合関係として定義できない共適応系の問題に対して、個体の内的改革をもたらす共生共進化アルゴリズムを適用する。計算機実験における獲得個体の解析により、共生関係に基づく解獲得の有効性を議論する。対象問題として *N*-クイーン問題を取り上げ、解と解全体の遺伝子表現を並び換える順列表現パターンとを共生関係と設定し、アルゴリズムを適用する。実験結果から共生共進化アルゴリズムの有効性を検証する。

さらに、共進化計算手法の応用例として繰り返し囚人のジレンマゲームおよび詰将棋の戦略獲得を扱う。これらの問題における計算機実験を通して提案手法の有効性を論ずる。

既存の進化計算手法に関する議論と問題点に対する解決法としての解のパッケージ化を行う競合共進化アルゴリズムの提案および応用事例による評価から、共適応系に対する適応手法として、共進化的計算手法が有効であると結論付ける。


本論文は、共進化的計算への拡張により、進化的計算手法のさらなる応用の可能性を示した。


平成 13 年 2 月 2 日


琉球大学大学院
理工学研究科長 殿

論文審査委員

主査 氏名 宮城隼夫 

副査 氏名 玉城史朗 

副査 氏名 仲尾善勝 

副査 氏名 遠藤聡志 

学位（博士）論文審査及び最終試験の終了報告書

学位（博士）の申請に対し、学位論文の審査及び最終試験を終了したので、下記のとおり報告します。

記

申請者	専攻名 総合知能工学専攻 氏名 根路銘 もえ子 学籍番号 988654B		
指導教官名	宮城 隼夫		
成績評価	学位論文	<input checked="" type="radio"/> 合格 <input type="radio"/> 不合格	最終試験 <input checked="" type="radio"/> 合格 <input type="radio"/> 不合格
論文題目	共適応系における共進化探索に関する研究		
審査要旨（2000 字以内）			
<p>共適応系とは、各々の進化主体が環境を通じた他の進化主体との相互作用によって、自身の特性を適応させる系を指す。実世界における問題の多くは共適応系の性質であり、それらに対する統一的な解法が求められている。本研究では、その解法としての共進化計算の一般化および拡張を行い、計算機実験を通して有効性を検証している。</p> <p>共進化計算とは、生物種の相互依存進化を模倣した計算論的枠組みの総称である。この枠組みは、生物種間の相互作用によって各々の種が進化することから、共適応系のダイナミクスの計算モデルであるといえる。自然界における共進化の種間関係には、競争・共生・寄生等がある。</p>			

(次頁へ続く)

審査要旨

このような自然界の諸現象を工学的にモデル化する試みが行われており、その計算モデルが、競合共進化アルゴリズムおよび共生共進化アルゴリズムである。本研究では、共進化アルゴリズムの先行研究において扱われていない共適応系の問題として、以下の3つの問題に対して、共進化アルゴリズムの設計を行っている。

- (1) 複数部分最適解が存在する問題
- (2) 共生関係を必要とする問題
- (3) 進化主体が作用関係を独自に決定する問題

まず、(1)の問題に対して、基礎実験を通して解を集合として獲得する枠組みの必要性を述べ、解のパッケージ化法を導入した競合共進化アルゴリズムを提案している。提案手法では、個体の集合をパッケージと定義し、問題の最適化に対して必要最小限の個体で構成されるパッケージを獲得する。したがって、問題に対する有効なパッケージは競合結果を補完し合う個体同士(相補的な個体集合)で構成されなければならない。有効なパッケージは全個体間の競合結果を求めることにより獲得可能であるが、それには膨大な計算コストを要する。提案アルゴリズムでは、各世代の競合結果から相補的な個体集合を生成し、相補関係を維持しつつ個体の追加・削除を逐次的に行うことによってパッケージの再構成を行う。このとき、1世代のみの競合結果に基づく個体の淘汰は、有効なパッケージに必要とされる個体までも淘汰する恐れがある。そこで、個体の継続評価を行うために、各個体に対して、存続可能世代数を示すパラメータ：*life-time*を設定する。したがって、本手法は、局所情報に基づき相補的な個体集合を生成し、*life-time*の設定による個体継続評価・個体淘汰の緩和を行うことによって、競合集団の変化に頑健なパッケージを獲得する。計算機実験では、まず、基礎実験において有効なパッケージの獲得能力および*life-time*の設定による獲得能力の向上について検証している。さらに、実問題への適用例として、競合結果が明確であるゲーム問題を取り上げ、計算機実験を通して本手法の有効性を検証している。まず、自明な最適解が存在するために解獲得の検証が容易に行える問題として、Tic-Tac-Toe ゲームを取り上げ、従来手法の適用結果との比較によって、戦略獲得に関する有効性を検証している。さらに、最適戦略の決定が困難な問題である詰将棋へ適用し、獲得戦略の推移を示すことによって有効なパッケージの生成過程について議論している。これらの実験結果の有効性から、複数の部分有効解が存在する問題に対しての解法を与えているといえる。

(2)の問題に対しては、問題の解と解の遺伝子表現とで共生関係を築くことにより、共生共進化アルゴリズムを設計している。共生は、生態学において、共進化の結果の1状態として定義される。しかしながら、Margulisは細胞内共生説を唱え共生進化の可能性を示している。そこで本研究では、共生関係を進化モデルとして設計し、実際に起こる進化過程を確認することを目的としている。N-クイーン問題を対象とした計算機実験において、遺伝子表現種の安定的な進化が解の進化を促進する要因であることを確認しており、共生共進化アルゴリズムの有効性を示している。

(3)の問題に関する研究として繰り返し囚人のジレンマ(IPD)ゲームを取り上げ、競合共進化アルゴリズムを設計することにより、解の進化過程に関する議論を行っている。計算機実験を通して、集団の協調関係が構築される可能性について検証している。その結果、記憶長パラメータの制御によって協調関係が実現できることを示している。

これらの研究は、共進化計算手法の一般化および拡張を行うことによって、共適応系への共進化計算手法による解法を与えている。すなわち、共進化的計算手法の設計によって、進化的計算手法のさらなる応用の可能性を示しているといえる。

以上のように、本論文は工学的に価値のある新しい研究成果が示されており、また、上記の者は専門分野および関連分野の十分な知識を有することも確認できたので、学位論文および最終試験とも合格とする。