

## 学位論文題名

A Study on Fitness Landscape of  
Evolutionary Computation

(進化的計算における適応度ランドスケープに関する研究)

## 学位論文内容の要旨

J. H. Holland に端を発する、自然界に見られる生物群の適応過程をメタファとする探索計算理論、すなわち進化的計算は様々な分野で優れた工学的有効性を発揮してきた。そこでは、与えられた問題（タスク）の解決を目論むシステム設計者は、生物個体を設計者の課すタスクに対する解法としてコード化し、個体の適応度をタスクの達成度と見做すことにより、個体群の生存競争を利用した問題解決を図ることになる。探索という過程に注目するとこの手法は、タスクによって定まる評価関数と探索解空間が仮想的に形成するジオメトリ上を、それぞれの適応戦略に従って、個体群が最も高い山の頂上を目指す振舞いとなる。ところで、個体群が採用した適応戦略が単純で固定的な場合、個体群は、ジオメトリ上で最適値を示す山の頂上以外の地点、すなわち局所解に収束する可能性が大きいという進化的計算手法の持つ宿命的問題となっている。

本問題解決に向けて、数多くの拡張手法がこれまでに提案されてきた。これらの手法は、進化的手法と上記のジオメトリの関係に基づいて、3種類に分類できる。(1) 特定の性質を持つジオメトリに対する有効な適応戦略を先験的知識として用いる方法。このタイプの手法は、特定の問題において優れた解決能力を示すが、それ以外に対する性能は全く保証されない。(2) あらゆるジオメトリにおいて効果的に機能する適応戦略を追求。ところが、万能の適応戦略を実現することなど現実的には不可能で、何をもって万能であるかを判定するための基準さえ存在しないという理由から、このようなアプローチは非現実的であると断定せざるを得ない。(3) 進化的手法の適応戦略が常に有効に機能できるように、ジオメトリの「見え方」を自律的に変化させる方法。これは本論文中で提案する手法である。この方法論で特徴的なのは、進化的手法における個体群が、ジオメトリとの間で、直接には相互作用を行わないことである。すなわち、個体群の適応戦略が単純かつ固定的であったとしても、「見え方」を適切に変化させることによって、ジオメトリ上で個体群が適応的に振舞うことが可能になる。ただしここで、「見え方」を変化させる機構をいかにして設計するかという新たなる問題が生じるが、これは個体群の適応戦略や、ジオメトリから分離されており、独立して議論することが可能である。そしてこの点において、本方法論は上述の第2のアプローチとは異なる。

本論文は、上記の課題に関して研究を行った結果について論述したものであり、5章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、従来の問題点、本研究の目的について述べている。特に、進化的手法のダイナミクスを記述するための共通概念として、これまで多くの文献において用いられながらも、厳密な定義が与えられてこなかった“適応度ランドスケープ”の定式化を行っている。そして、上述のジオメトリの「見え方」を制御する方法論として、“適応度ランドスケープ制御”を提案し、その枠組みの定式化を行っている。そこでは Landscape Regulator によって上述のようなジオメトリの「見え方」を変化させ、それを Regulator Controller によって制御する。

以降の3章では，“適応度ランドスケープ制御”の具体的なシステムへの実装を試みている。

第2章では、遺伝的アルゴリズムにおける注視領域の適応的決定機構の、適応度ランドスケープ制御による実現を図っている。これは、本方法論の最も単純かつ基本的な実現方法である。ここでは、Regulator Controller と Landscape Regulator はそれぞれ、管理者と、管理者が作成する指令書といった役割を担い、探索者に相当する個体集団と、有機的な相互作用を行いながら探索を実行する。管理者の役割は、探索者集団の収束を避け、かつ探索者がランドスケープの同一地点を幾度も探索することを抑制することにある。そこで管理者は、探索者集団のランドスケープにおける分布状況から、それらの適応度や収束の程度を計算し、探索者が次にどこを探索すべきかという指令書を作成する。また逆に、既に探索を修了した領域に関して、そこでの探索を抑制させるための情報も同時に記入される。これによって、探索者は多数の局所解を素早く発見しながらも、そこに留まることなく、常に探索し続けることが可能になる。行った計算機実験においては、組み合わせ最適化問題などを従来法よりも高速に解け、かつGA困難と呼ばれるクラスに属する問題においても最適解を発見し、その有効性を実証している。

第3章では、遺伝的プログラミングによる二進決定グラフを用いた帰納学習システムの構築を試みる。これは、ある与えられた概念を正しく、可能な限りコンパクトに表現する二進決定グラフを、遺伝的プログラミングによって発見しようとする試みである。このとき、これら2つの要求のうち、どちらを優先してランドスケープに反映すべきかは問題そのものの性質に依存し、探索状況に応じて刻一刻と変化するものと予想される。そこでRegulator Controllerが個体集団の状況を観測し、その結果に基づいて両者の重み付けを変更する。さらにここでは、Regulator Controllerが個体集団の状況に応じて、概念を構成するインスタンスに対する重み付けをも変更することで、学習の速度や精度が著しく向上することも明らかにしている。なお論文の中では、本提案手法によってJ. R. Kozaの手法よりも圧倒的に小さな計算コストで、より高い精度での学習が可能となった計算機実験の結果を示している。

第4章では、遺伝的アルゴリズムによる学習機能を有する自律エージェントの進化モデルの構築を試み、自律エージェントの学習機構の構造設計と、その評価機構の構築を行っている。ここでRegulator Controllerは、進化的手法における生存競争を勝ち残ったエージェントと、敗れて集団化から削除されたエージェントの行動戦略から、適応度ランドスケープを推定し、未学習のエージェントにとって達成しやすい学習目標を設定する。これによって設計者は、エージェントを訓練するための学習スケジュールを組む作業や、コスト関数やペナルティ関数によって、エージェントが学習しやすいようにランドスケープを調整する作業から解放される。多くの計算機実験から、エージェントがタスク遂行に関して最適な学習機構の構造を獲得する過程と、Regulator Controllerが適切な学習目標を設定できていることが明らかになった。

第5章では、本研究で得られた知見を総括し，“適応度ランドスケープ制御”によって、進化的手法そのものには一切の拡張を施さずとも、高度な問題解決器の構築が可能になることに言及し、本研究の結論としてまとめている。また、Regulator Controllerの設計においては、ランドスケープの性質に関する先験的知識を導入する必要のないことから、より複雑な環境に対しても、本アプローチが適用可能であることも言及している。

# 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 佐 藤 義 治

学 位 論 文 題 名

## A Study on Fitness Landscape of Evolutionary Computation

(進化的計算における適応度ランドスケープに関する研究)

近年、計算機を利用した情報処理分野で種々の新しいパラダイムの模索が行われている。それらは総じて実際の生体生物系における情報処理系に触発されたものであり、従来のシステム工学的情報処理機構の設計そのものからの脱却を目指している。探索理論分野では、J. H. Hollandに端を発する、自然界に見られる生物群の適応過程をメタファとする探索計算理論、すなわち進化的計算研究が行われ、様々な分野で優れた工学的有効性を発揮してきた。そこでは、与えられた問題に対する解候補としてコード化される疑似個体群が、問題によって定まる評価関数が探索解空間上に仮想的に形成するジオメトリ上を、それぞれの適応戦略に従って、最も高い山の頂上を目指す振舞いとなる。しかしながら、個体群が採用した適応戦略が単純で固定的な場合、個体群は、ジオメトリ上で最適値を示す山の頂上以外の地点、すなわち局所解に収束する可能性が大きくなり、これは進化的計算手法の持つ宿命の問題となっている。本論文では、このような問題背景に基づき、進化的手法の適応戦略が常に有効に機能できるように、ジオメトリの「見え方」を自律的に変化させ、ジオメトリに依存せず個体群が適応的に振舞うための方法論を展開している。すなわち、その主要な成果は以下の5点に要約される。

1. 進化的手法のダイナミクスを記述するための共通概念として、これまで多くの文献において用いられながらも、厳密な定義が与えられてこなかった“適応度ランドスケープ”の定式化を行っている。そして、これに基づいて上述の問題についての議論、考察を行い、探索解空間ジオメトリの「見え方」を変化させる Landscape Regulator と、それを制御する Regulator Controller からなる“適応度ランドスケープ制御”を提案している。
2. 本方法論の最も単純かつ基本的な実現方法として、遺伝的アルゴリズムにおける注視領域の適応的決定機構の、適応度ランドスケープ制御による実現を図っている。ここでは、Regulator Controller と Landscape Regulator はそれぞれ、管理者と、管理者が作成する指令書といった役割を担い、探索者に相当する個体集団と、有機的な相互作用を行いながら探索を実行し、これによって探索者は多数の局所解を素早く発見しながらも、そこに留まることなく、常に探索し続けることが可能になっている。行った計算機実験においては、組み合わせ最適化問題などを従来法よりも高速に解け、かつ GA 困難と呼ばれるクラスに属する問題においても最適解を発見し、その有効性を実証している。
3. 本方法論の多目的最適化への応用として、遺伝的プログラミングによる二進決定グラフを用いた帰納学習システムの構築を試みている。これは、与えられた概念を正しく、コンパクトに表現する二進決定グラフを発見しようとする試みであり、問題そのものの性質、および探索状況に応じて優先度が変化することを感知して、Regulator Controller によって個体集団の状況が観測され、その結果に基づいて両者の重み付けを自律的に変更するような方法論である。さらにここでは、Regulator Controller が個体集団の状況に応じて、概念を構成するイン

スタンスに対する重み付けをも変更することで、学習の速度や精度が著しく向上することも明らかにしている。

4. 遺伝的アルゴリズムによる学習機能を有する自律エージェントの進化モデルの構築を試み、自律エージェントの学習機構の構造設計と、その評価機構の構築を行っている。ここで Regulator Controller は、生存競争を勝ち残ったエージェントと、敗れて集団化から削除されるエージェントの行動戦略から、適応度ランドスケープを推定し、未学習のエージェントにとって達成しやすい学習目標を設定する機能を付与されている。計算機実験においては、コスト/ペナルティ関数を用いずに、エージェント群が学習スケジュールを自律的に生成する振舞いが確認されている。
5. 本研究で得られた知見を総括し、適応度ランドスケープ制御によって、進化的手法そのものには一切の拡張を施さずとも、高度な問題解決器の構築が可能になることに言及し、本研究の結論としてまとめている。また、Regulator Controller の設計においては、ランドスケープの性質に関する先験的知識を導入する必要のないことから、より複雑な環境に対しても、本アプローチが適用可能であることにも言及している。

これを要するに本論文は、進化的計算手法において問題空間の複雑性に関わり無く、ロバストな探索能力を維持させるための理論開発と、そのメカニズムに関する設計手法を提案したものであり、種々の実験結果を通して多くの新知見を得ており、計算機工学、情報工学の進歩に寄与するところ大である。よって著者は、工学博士の学位を授与される資格あるものと認める。