

遺伝的アルゴリズムの混合システムの モデリングに関する研究

学位論文内容の要旨

最適化問題において効率良く最適解，準最適解を得ることは工学上の重要な課題であり，これまでに多くの最適化手法が提案されてきたが，遺伝的アルゴリズム (genetic algorithm; GA) もその中の有力な手法の一つである．近年，GA は工学を中心とする様々な分野の最適化問題に適用され，良好な結果が数多く報告されている．それに伴い，その基礎的な性質を探索する研究が重要性を増している．

GA の理論的解析は様々なアプローチによって試みられているが，その中でも特に有効と考えられるのが微分方程式や差分方程式，マルコフ連鎖，離散力学系などを利用して GA の振舞いを記述する数理モデルを立て，解析を行うアプローチである．これらに共通するのは，GA における個体群を何らかの数学的形式で表現し，遺伝的操作がその個体群表現にもたらす変化を数理的に記述するという点である．

これらの数理モデルは対象の GA の振舞いを特徴付け，その性質を探索するための有効な道具であるが，共通の問題点も存在する．例えば，解析対象の GA に対応する具体的なモデルを得るためには，その GA を特徴付けているパラメータがすべて既知である必要がある．また，これらのモデルはいずれも，振舞いを精密に記述するために，その記述対象となる GA をある程度限定していた．例えば最も汎用性が高い Vose が提案した数理モデルにおいても，その全体的な枠組みに関しては一般の GA に対して広く適用できるものの，ヒューリスティック関数と呼ばれる主要な構成要素が定式化されているのは標準的な構成の GA に対してのみである．したがって，記述の対象から外れるような構成の GA に関しては，これらの数理モデルから導かれる解析結果を直接利用することはできない．また，GA の基礎的な性質を深く知るためには特定の GA を多様な GA 群の中で相対的に位置付けることが必要であるが，これまでそうした研究はほとんど見られなかった．

本論文の目的は，以上のような問題意識に基づき，混合システム的な視点から GA をモデリング及び解析するための数理的枠組みを構築することにある．具体的には，主に次の 2 点について論じている．

1. サンプルデータからの学習を利用したモデリング手法

現代の個体群を「入力」，その一世代先の個体群を「出力」，GA を入出力データを発生する「情報源」と見なし，サンプルデータからの学習を利用して GA をモデリングする手法を導入する．これにより，システムに関す

る正確な情報が未知の場合や、これまでの数理モデルの記述対象から外れる場合も含め、多様な GA の振舞いを共通の形式で記述することが可能となる。

2. GA の混合モデル

上で述べたモデリングにおける「共通の記述形式」として、混合モデルの概念を導入する。これにより、モデリング手続きにおける計算コストの軽減が期待されるとともに、特徴が既知であるような GA のモデル構造を利用する形で未知の GA を記述することが可能となり、得られたモデルからの特徴抽出や複数のモデル間での比較が容易となる。

第1章では、序論として、研究の背景及び本論文の目的について述べている。

第2章では、次章以降の準備として、GA の概要について簡単にまとめている。まず GA の基本的な構成及びそこで用いられる概念について概説した後、最適化手法としての特徴及びその位置付けについて考察している。

第3章では、GA とそのモデルとしての離散力学系との対応について考察している。まず初めに本論文の直接の背景となっている Vose の GA モデルについて概観し、さらにその離散力学系としての幾何学的な特徴について数値実験を通じて解析を行うとともに、それらの特徴をもとにした GA の解析に関して議論している。

第4章では、サンプルデータからの学習を利用した GA のモデリングについて議論している。まず初めに学習によるモデリング手法を導入する動機について述べるとともに、以降の議論に必要な準備を行っている。次に、モデリングの具体的な手続きを示し、本手法と Vose の GA モデルとの関係について明らかにしている。続いて、第5章で述べる混合システムのモデリングとも密接に関わることになるモデルの記述形式を利用した GA の解析について論じている。さらに数値実験を通じてその有効性を検証し、最後にモデリングの統計的な側面及び巨視的なモデリングへの適用について議論している。

第5章では、GA の混合システムのモデリングについて述べている。具体的には、複数の部分システム（エキスパート）の組合せで全体のシステムを表現する混合モデルのアイデアを第4章で述べたモデリング手法に適用した場合について論じている。まず初めに、GA のモデリングに混合システムの視点を導入する動機について述べ、混合モデルに関する既存の研究を概観している。続いて本論文で取り上げる2種類の GA の混合モデルの定義及びその意味付けについて述べ、さらに数値実験を通じてこれらのモデルを利用した GA 解析の有効性について検証している。最後に、モデリングに必要となるエキスパートの数に関してや2つの混合モデルの使い分けなど、混合モデルを利用した GA のモデリング及び解析に関する全般的な議論を行っている。

第6章では、本論文で得られた結果及びその意義についてまとめ、今後に残された課題を示している。

学位論文審査の要旨

主査	教授	栗原正仁
副査	教授	宮腰政明
副査	教授	工藤峰一
副査	教授	佐藤義治

学位論文題名

遺伝的アルゴリズムの混合システムの モデリングに関する研究

遺伝的アルゴリズム (GA) は、いわゆる進化的計算と呼ばれる生態系から着想を得た計算モデルの基礎として、システム情報工学における最適化や探索を中心とする様々な応用でその効果が認められてきている。GA は基本的にはヒューリスティックな手法であり、問題領域毎に発見的な知識を利用してデータ構造やアルゴリズムの構成要素を設計する。しかし、一方ではヒューリスティックな設計に出来るだけ普遍的な指針を与えることを目的として、GA を統一的な理論的枠組みで議論する研究も着実に進展してきている。

本論文は、後者の流れの中での新しい方向性として、GA を機械的な学習の対象と捉えることによるモデリング理論の先駆けとなる研究成果を述べている。その潜在的な応用可能性としては少なくとも2つの方向性がある。一つはメカニズムが未知な生態系のシミュレーションである。個体群分布の進化の統計的情報だけが知られているときに、その内部メカニズムを工学的なアルゴリズムである GA としてモデル化することにより、近似的なシミュレーションが可能となる。

もう一つの方向性は、GA の具体的なメカニズムは既知だが、その計算複雑度が高いために実行が極めて非効率的な場合の近似による効率的な実行である。特に、単純 GA と呼ばれる基本的なクラスの GA がハードあるいはソフトで効率的に実装されていると想定すると、複雑な GA をいくつかの単純 GA の混合モデルとして近似することにより、効率的な実行が可能となる。

本論文の成果はこのような方向性を与える第一歩として独創的なものであり、GA を遺伝子型分布の時系列的変化を記述した離散力学系とみなす Vose のモデルを基礎にして、機械学習の観点からモデルの推定手法を構築し、さらに単純 GA と呼ばれる具体的なクラスの混合によりその理論を構成的に発展させている。すなわち、その内容は次の2点に要約される。

1. 機械学習に基づく GA のモデリング理論の構築

著者は、GA としてモデル化されるべきシステムを一旦その入出力関係だけで抽象化し、その入出力サンプルから内部メカニズムを推定する対象として捉え直している。すなわち、現世代の個体群の遺伝子型分布を入力、次世代の個体群の遺伝子型分布を出力、対象システムをその入出力データを発生するあるクラスの情報源と見なし、対象の観測から得られるサンプルデータからの機械学習によって、その情報源を構成するパラメータの値を推定するという枠組みで理論を構築している。これは最近注目されている Vose の GA モデルを基礎として、それを従来にない観点から発展させたものとして、その独創性を評価する。

2. 単純 GA の混合によるモデル合成法の開発

著者は、前項の理論的基礎に基づいて、内部メカニズムが未知または計算コストの高いシステムを、単純 GA と呼ばれる性質が既知で相対的に計算コストの低いモデルの混合によって合成する手法を開発している。すなわち、単純 GA の内部プロセスを選択 (写像 $\mathcal{F}$) と遺伝子組換え (写像 $\mathcal{M}$) に分離したときに、その合成写像 $\mathcal{G}$ を混合する $\mathcal{G}$ -混合モデルと $\mathcal{F}$ を混合しその結果を $\mathcal{M}$ と合成する $\mathcal{F}$ -混合モデルの 2 つのアプローチを述べ、エキスパートの混合という視点からそのアルゴリズムの応用的意味を議論し、基本的な計算機実験を通してその特徴を明らかにしている。これは前項で構築したモデル化手法をさらに構成的に洗練化させ、工学的な応用可能性の道筋をつけたものとして評価できる。

これを要するに、著者は機械学習を利用した混合システムの観点から遺伝的アルゴリズムを合成するための数理モデル及び関連するアルゴリズムを開発し、この分野の新たな展開を図ったものであり、数理情報工学並びにシステム情報工学の発展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。