



進化戦略における自己適応の拡張に関する研究

松村, 嘉之

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2002-09-30

(Date of Publication)

2008-11-12

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲2662

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002662>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



【 260 】

氏 名 ・(本 籍) 松村 嘉之 (兵庫県)

博士の専攻分野の名称 博士 (工学)

学 位 記 番 号 博い第277号

学位授与の 要 件 学位規則第4条第1項該当

学位授与の 日 付 平成14年9月30日

【 学位論文題目 】

進化戦略における自己適応の拡張に関する研究

審 査 委 員

主 査	教 授	上田	完次
	教 授	北村	新三
	教 授	田浦	俊春
	助教授	大倉	和博

自然進化に倣った進化型計算は、種々の最適化問題に適用できる頑健な手法として知られている。特に、進化戦略は実数値表現の目的変数と変化量を制御する戦略パラメータの2つの変数を一組として用いる個体表現法を採用していることが特徴である。これにより、進化過程で突然変異によるステップサイズの大きさが適応していくことにより、実関数最適化問題に対して優れた性能を示すと言われている。

しかしながら、高次元問題や超多峰性問題を取り扱う場合には、従来の進化戦略が持つ適応能力は十分であるとは言えない。これは戦略パラメータが大域最適解に近づく以前に非常に小さくなる現象が現れ、その結果、突然変異のステップサイズも極めて小さくなり、実質的に探索点が動かない状態に陥り集団が収束する、いわゆる早期収束が起こりやすいからである。

一般には、これを回避するために、問題の特徴に合わせた最適な下限を設定して戦略パラメータが小さくならないようにしている。しかし、この最適な下限を設定することは、(1)本来進化型計算が目指した頑健性を失い、(2)それ以上ステップサイズが小さくならず局所探索の能力を衰えさせてしまうことから、望ましい手法であるとは言い難い。

そこで本論文では、この早期収束の現象を回避するため、適応能力を向上させる手法を新たに構築している。この基本的アイデアは、戦略パラメータに対し選択圧によらない確率的变化要因を加え、特定の値に固着しにくくしようとするものである。それゆえ、各有効な戦略パラメータの他に冗長な戦略パラメータを持つ個体表現法を採用し、有効なものと冗長なものとを確率的に入れ替える新しい突然変異手法を提案した。そして、標準テスト関数に対する基本性能およびノイズに対する性能を計測し、提案手法と代表的な従来手法との比較を行うことで、提案手法の有効性を実証した。また、進化ダイナミクスの解析を行うことにより手法の特徴を明らかにし、工学的実問題への応用を通して手法の有用性を検証した。さらに、組換え操作による自己適応の補完に注目し、組換え操作と自己適応の相性を検証した。

本論文の各章は以下のように要約される。

第1章では、本論文の背景と目的、及び論文全体の構成を示した。

第2章では、本論文において対象とする進化型計算手法のうち1960年代に始まった進化戦略、進化的プログラミング、遺伝的アルゴリズムの3つの手法の概略を紹介した。次に、本論文が取り扱う実関数最適化問題を定義し、この問題領域における自己適応を説明した。特に、各手法に関する自己適応の関連研究について述べ、研究領域を明らかにした。そして、探索空間の次元が高くなるほど、また、適応度景観が複雑になるほど、集団が大域最適解を発見する以前に戦略パラメータが非常に小さくなる傾向が現れ、その結果、突然変異のステップサイズも極めて小さくなり、実質的に探索点が動かない状態に陥って集団が収束することが自己適応の問題点であると指摘した。

第3章では、本論文において動機付けられている生物進化メタファについて述べ、戦略パラメータの適応能力を向上させる拡張手法の基本的アイデアを説明した。提案手法は、分子進化の中立説に動機付けられており、戦略パラメータの進化に選択圧によらない確率的变化要因を加えることで、特定の値に固着しにくくしようとするものであることを説明した。そして、各有効な戦略パラメータの他に冗長な戦略パラメータを持つ個体表現法を採用し、冗長なものと有効なものとを確率的に入れ替える新しい突然変異手法を定式化した。さらに、自己適応の拡張を補完する Multi-parent Recombination (MPR) について関連研究を述べ、本論文において参照する3つのMPRについて説明した。

第4章では、進化戦略の一種として考えられる進化的プログラミングに関する自己適応の拡張法について議論した。実関数最適化問題における標準テスト関数を対象とした計算機実験により、従来の進化的プログラミングは、戦略パラメータが極端に小さくなり、早期収束の状態に陥りやすいことを確認した。それに対し、第3章で定式化した提案手法は、標準テスト関数に対し、早期収束の状態を回避でき、戦略パラメータの下限設定に対する頑健性が従来手法に比べて向上した。進化ダイナミクスの観測を行った結果、従来手法に比べて提案手法は局所探索と大域探索のバランスが強化され、探索領域を伸縮しているため、遺伝的浮動の効果が発揮されていると考えられる。また、ノイズを含むテスト関数に関しても、従来手法と比較し、提案手法の有効性を実証した。さらに、工学的実問題への応用として多指ハンドによる物体の把持問題を取り上げ、Liapunov の安定条件及び接触安定条件を満たす指先位置・指先力計画の最適化を行った。この問題は27の非線形制約条件付き最適化問題であり、超多峰性問題の一つと考えられる。特に、進化的プログラミングの特徴である最良個体が生存する点は、全ての拘束条件を一度充足すれば少なくとも1個体が拘束条件を充足したまま生存することが約束されるため、この問題に有効であると考えられる。しかしながら、従来手法を用いた計算機実験では全ての拘束条件を満たす解の発見が困難であることを確認した。それに対し、提案手法では、全ての拘束条件を満たす解を高速に発見することが可能となり、非線形制約条件付き最適化問題に対する提案手法の有用性を実証した。以上より、進化的プログラミングにおける分子進化の中立説に動機付けられた自己適応の拡張法の妥当性を示したと言える。

第5章では、進化戦略における自己適応の拡張法に関して、問題の次元に重点をおいて議論した。標準テスト関数を用いた計算機実験では、従来の進化戦略は、進化的プログラミングの場合と同様に、第2章で指摘した状態になりやすいことを明らかにした。これに対し、第3章で定式化した自己適応の拡張法を進化戦略に適用した手法を提案した。標準テスト関数を対象とした計算機実験により、提案手法は従来手法に比べて、戦略パラメータの下限値に対する頑健性が、向上することを実証した。提案手法の特徴を知るために突然変異率と問題の次元スケールによる進化ダイナミクスの変化を観測し、提案手法は問題

(氏名： 松村嘉之、 NO. 3)

の次元スケールと突然変異率のパラメータ値に対し頑健であることを確認した。また、ノイズを含むテスト関数に関してもノイズに対する提案手法の頑健性を実証した。さらに、工学的実問題への応用として、自律移動ロボットのナビゲーション問題における Continuous-Time Recurrent Neural Networks (CTRNNs)の進化的設計を取り扱った。この CTRNNs は、実数値の入出力を取り扱うことが可能であり、連続時間を対象にしている。そのため、回路規模に対して変数は指数関数的に増大し、標準テスト関数に比べて次元の高い最適化問題となる。この高次元の問題に対しても、従来手法に対する提案手法の性能の向上を計算機実験により実証した。以上より、第 4 章の進化的プログラミングと比べて確定的選択とエリート保存されない点が異なる進化戦略においても、自己適応の拡張法の妥当性を示したと言える。

第 6 章では、進化戦略における MPR による自己適応の補完を議論した。従来手法と提案手法に関して、Intermediate Recombination (IR)と Discrete Recombination (DR)を実数値変数と戦略パラメータの両方に用いる場合の MPR の性能を検証し、その進化ダイナミクスを解析した。標準テスト関数、ノイズを含むテスト関数を対象とした計算機実験により、MPR によって進化過程における探索集団の空間的な偏りが無くなり、MPR は自己適応を補完することを明らかにした。特に MPR の中でも、実数値変数と戦略パラメータを一組とみなして DR を用いる Global Combined Discrete Recombination (GCDR)は、全ての標準テスト関数、ノイズを含むテスト関数において自己適応と相性が良い。また、工学的実問題への応用として、Evolutionary Artificial Neural Networks の進化的設計を取り上げた。この設計では結合荷重だけでなく構造の設計も同時に行っているため、標準テスト関数の場合と異なり可変長の個体表現となる。そのため、適応度景観は絶えず変化し、どのような形状かは定かにならない。そのため、広く探索を行う GCDR によって性能の向上が実証されたと考えられる。

第 7 章では、本論文のまとめとして結論を述べた。

以上により、本論文は、実関数最適化問題に対して、進化型計算手法における分子進化の中立説に動機付けられた自己適応の拡張法の有効性と、MPR による自己適応の補完に関して、GCDR の有効性を実証したと結論付けられる。

(別紙 1)

論文審査の結果の要旨

氏名	松村 嘉之		
論文 題目	進化戦略における自己適応の拡張に関する研究		
審査 委員	区 分	職 名	氏 名
	主 査	教授	上田 完次
	副 査	教授	北村 新三
	副 査	教授	田浦 俊春
	副 査	助教授	大倉 和博
	副 査		
要 旨			
自然進化に倣った進化型計算は、種々の最適化問題に適用できる頑健な手法である。その中でも進化戦略は、実関数最適化問題に対して優れた最適化性能を示すと言われている。これは、実数値表現の目的変数と変化量を制御する戦略パラメータの2つの変数を一組として用いる個体表現法を採用し、突然変異のステップサイズが進化過程の中で適応していく特徴を持つことに起因する。 しかしながら、高次元問題や超多峰性問題を取り扱う場合には、標準的な進化戦略が持つ適応能力は十分ではないことが分かっている。これは、大域最適解に近づく以前に戦略パラメータが非常に小さくなり、それに伴い突然変異のステップサイズも極めて小さくなってしまい、実質的に探索点が動かない状態に陥って集団が収束するという、いわゆる早期収束現象を引き起こすからである。 従来、これを回避するために、適応度景観の特徴に合わせて戦略パラメータの下限を何らかの方法で見つけて設定している。しかし、この下限を設定する方法では、(1) 解法の問題依存性が大きくなること、および、(2) それ以上ステップサイズが小さくならず局所探索能力が失われることから、望ましい手法であるとは言い難い。 そこで、本研究では、この早期収束の現象を回避することにより適応能力を飛躍的に向上させる手法を新たに構築している。この基本的アイデアは、戦略パラメータに対し選択圧によらない確率的变化要因を加え、特定の値に固着しにくくしようとするものである。それゆえ、有効な戦略パラメータの他に冗長な戦略パラメータを持つ新しい個体表現法と、それに適切な突然変異手法を設計し提案している。そして、(1) 標準テスト関数、(2) ノイズを含んだテスト関数、および(3) 工学的実問題の3つのレベルで従来手法と提案手法の最適化性能を比較するとともに、進化ダイナミクスの解析を行うことによって、提案手法の進化的振る舞い特徴を明らかにしている。また、進化戦略での組換え操作の有効性は非常に問題依存であって、どのタイプの組み換え操作がよいのか慎重に見極める必要があった。この点に対しても綿密に取り組み、提案手法に適した組み替え操作がどれであるかを割り出している。 本論文の各章は以下のように要約される。 第1章では、本論文の背景と目的、及び論文全体の構成を示している。 第2章では、本論文において対象とする進化型計算手法のうち1960年代に始まった進化戦略、進化的プログラミング、遺伝的アルゴリズムの3つの手法の概略を紹介している。次に、本論文が扱う実関数最適化問題を定義し、この問題領域における自己適応の機構と振る舞いに関して説明している。特に、これまでの自己適応の関連研究についてまとめ、研究領域を明らかにしている。そして、探索空間の次元が高くなるほど、また、適応度景観が複雑になるほど、早期収束の現象が顕著に現れることを指摘している。 第3章では、本研究を動機付けた生物進化メタファについて述べ、戦略パラメータの適応能力を向上させる提案手法の基本的アイデアを説明している。まず、分子進化の中立説に動機付けられていることを説明した後、各有効な戦略パラメータの他に冗長な戦略パラメータを持つ個体表現法、およびそれに適した新しい突然変異手法を定式化している。さらに、自己適応の拡張を補完する Multi-parent Recombination(MPR)について関連研究の動向をまとめ、本論文において参照する3つの基本的 MPR について説明している。 第4章では、進化戦略の亜種として位置付けることのできる進化的プログラミングに関する自己適応の拡張法について議論している。はじめに、実関数最適化問題における標準テスト関数を対象とした計算機実験により、従来の進化的プログラミングは早期収束の状態に陥りやすいことを確認している。それに対し、前章で詳述した提案手法では、戦略パラメータの下限値設定問題はほとんど解消されている			

氏名	松村 嘉之
----	-------

ことを確認している。さらに進化ダイナミクスの観測を行い、従来手法に比べて提案手法は局所探索と大域探索のバランスを適切にとって探索領域を伸縮させていることを明らかにし、これを遺伝的浮動の効果によるものと考察を加えている。ノイズを含むテスト関数の場合においても同様な有効性を確認している。工学的実問題への応用として多指ハンドによる物体の把持問題を取り上げ、安定条件を満たす指先位置・指先力計画の最適化を行っている。まず、従来手法を用いて計算機実験を行い、全ての拘束条件を満たす解の発見でさえ困難であることを確認し、次に、提案手法を用いて同じ計算機実験を行い、全ての拘束条件を満たす解を高速に発見すること、そして、さらに最適化を進めることを確認している。

第5章では、進化戦略における自己適応の拡張について議論している。標準テスト関数を用いた計算機実験では、従来手法では早期収束の状態になりやすいことを確認するとともに、提案手法は、前章の進化的プログラミングと同様に、下限値設定問題をほとんど完全に克服していることを示している。また、提案手法の特徴を知るために、突然変異率と問題の次元スケールによる進化ダイナミクスの変化を観測し、提案手法の問題の次元スケールと突然変異率のパラメータ値に対する頑健性を検証している。ノイズを含むテスト関数に対しても提案手法の頑健性と性能向上を確認している。工学的実問題への適用例として、自律移動ロボットのナビゲーション問題における連続時間型リカレントニューラルネットワークの進化的設計問題を取り扱い、従来手法に対する提案手法の性能の向上を計算機実験により確かめている。

第6章では、進化戦略におけるMPRによる自己適応の補充に関して議論している。従来手法と提案手法でIntermediate Recombination (IR)とDiscrete Recombination (DR)を実数値変数と戦略パラメータの両方に用いる場合のMPRの性能を検証し、その進化ダイナミクスを解析している。標準テスト関数やノイズを含むテスト関数を対象とした計算機実験により、MPRによって進化過程における探索集団の空間的な偏りが無くなり、MPRは自己適応を補充することを示している。特にその中でも、実数値変数と戦略パラメータを一組とみなしてDRを用いるGlobal Combined Discrete Recombination(GCDR)は、本実験で扱った全ての標準テスト関数、ノイズを含むテスト関数において自己適応と相性が良いことを実証している。工学的実問題への適用例として、人工神経回路網の進化的設計問題を取り上げている。この設計では結合荷重だけでなく構造の設計も同時に行っているため、標準テスト関数の場合と異なり、個体表現が可変長のとなる非常に困難な最適化問題になっている。これに対しても同様に明確な有効性があることを検証している。

このように、本研究は、進化戦略を高次元問題や超多峰性問題に適用する場合により顕著に現れる早期収束の問題に対して、その解決方法を提案するとともに提案手法の有効性・頑健性を様々な角度から解析および検証したものであり、工学分野に頻繁に現れる最適化問題に対して、人工進化に基づく問題解決法の設計の際の重要な知見を得たものとして価値ある集積であると認める。

よって、学位申請者の松村嘉之は、博士（工学）の学位を得る資格があると認める。