



自然進化戦略によるレンズ系設計

東京工業大学
小野 功

1. はじめに

レンズ系設計問題は、非明示制約付きブラックボックス関数最適化問題¹⁾として定式化され、さらに、しばしば目的関数の景観が大域的な多峰性²⁾を有する問題になることから、困難な最適化問題として知られる。ブラックボックス関数最適化問題は、目的関数が陽に与えられない困難な問題クラスである。これは、勾配を解析的に求めることができず、線形性や凸性などの数学的な仮定を置くことができないことを意味する。非明示制約付き問題は、制約式が明示的に与えられず、目的関数を計算することによってのみ、解の実行可能性が判明する困難な問題クラスである。これは、制約式の勾配を用いる解析的な手法や、制約違反量を用いるペナルティ関数法を用いることができないことを意味する。大域的な多峰性は、目的関数が複数の大谷³⁾から構成される性質である。大谷とは、微視的には複数の局所解が存在するが、巨視的には1つの大きな谷をなす関数である。大域的な多峰性関数は、大谷関数よりも最適化が困難であることが知られる。

自然進化戦略 (Natural Evolution Strategies, NESs)⁴⁾は、進化計算の一種であり、有力なブラックボックス関数最適化手法の1つである。NESsは、ある確率分布 $p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})$ に従ってサンプルされる解 \mathbf{x} の目的関数 $f(\mathbf{x})$ の期待値 $J(\boldsymbol{\theta})$ を最小化するパラメータ $\boldsymbol{\theta}^*$ を自然勾配法⁵⁾に基づいて探索することにより、間接的に目的関数 $f(\mathbf{x})$ の最適解 \mathbf{x}^* を探索する。元の目的関数 $f(\mathbf{x})$ はブラックボックスであるため勾配 $\nabla_{\mathbf{x}}f(\mathbf{x})$ を求めることはできないが、確率分布 $p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})$ として多変量正規分布を用いた場合、目的関数の期待値 $J(\boldsymbol{\theta})$ の自然勾配 $F(\boldsymbol{\theta})^{-1}\nabla_{\boldsymbol{\theta}}J(\boldsymbol{\theta})$ は近似的に求めることができる。ここで、 $F(\boldsymbol{\theta})$ はフィッシャー情報行列である。

非明示制約付きブラックボックス関数最適化のための有力なNESsとしてDX-NES-IC (distance-based exponential natural evolution strategy taking account of implicit constraint)⁶⁾が提案されている。DX-NES-ICは、確率分布 $p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta})$ として多変量正規分布 $p(\mathbf{x}|\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{m}, \mathbf{C}))$ を用いる。DX-NES-ICは、探索をロバスト化するための工夫であるfitness shaping⁴⁾、exponential parameterization⁷⁾、および、探索効率を向上させるための工夫であるdistance weight⁸⁾、学習率の適応的切り替え⁸⁾、対称変量法の導入⁸⁾に加えて、非明示制約へ対処するための工夫として、実行不可能解を考慮した解の重みづけ⁶⁾、多変量正規分布の拡大の強調操作⁶⁾、実行不可能解を考慮した学習率の調整⁶⁾を導入した手法である。DX-NES-ICは大谷構造を有する非明示制約付きブラックボックス関数最適化問題において良好な探索性能を示すことが報告されている⁶⁾。

本稿では、DX-NES-ICとDX-NES-ICを大域的な多峰性関数へ適用する際の工夫を紹介し、大域的な多峰性を考慮した工夫を導入したDX-NES-ICをレンズ系設計問題へ適用した事例を紹介する。レンズ系設計問題としては、ガラス選択を行わない3枚組固定焦点レンズ系、4枚組固定焦点標準レンズ系、2群7枚ズームレンズ系の設計問題と、ガラス選択を行う4群6枚組固定焦点標準レンズ系の設計問題を扱う。