

学位論文題名

遺伝的アルゴリズムの原子炉異常診断および
放射線防護最適化への応用

学位論文内容の要旨

遺伝的アルゴリズム(GA)は、ダーウィンの進化論の発想に基づいて生物進化の過程を抽象化したアルゴリズムであり、多点情報を利用した確率的探索法の一つである。80年代後半から90年代に入ってから、遺伝的アルゴリズムは新たな最適化または探索手段として、さまざまな研究分野への試みが多くなってきた。原子力工学においても、GAの特有な探索能力を発揮できるような問題が多数存在する。しかし、現状では、このような応用例はまだ非常に少ない。本論文では、原子炉異常診断システムにGAで学習させたニューラルネットワークを診断手段として用いる問題、および被曝作業場所の作業員配置最適化問題に、複数の評価関数とハードな制約条件を用いた遺伝的アルゴリズムを適用した。それらの応用を通じて、原子力工学分野における遺伝的アルゴリズムの有効性を実証したものである。

本論文は5章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章は序論として、本論文の研究背景と目的について述べた。原子力工学分野における新しい学習・探索手法の応用状況を概説し、そしてGAの原子力分野への導入の可能性および妥当性を説明した。具体的に、本論文は以下に示す原子力工学における非常に重要な問題にGAを適用した。

- ①GAを学習手段としたニューラルネットワーク(NN)を原子炉異常診断システムへの応用。
- ②放射線被曝作業の作業員配置最適化問題へのGAアプローチ。

第2章では、遺伝的アルゴリズムの基本的な構成、動作例、現在の応用状況およびGAをバックアップする基本的な理論「スキーマ理論」について詳述した。GAの動作例として、国際放射線防護委員会報告(ICRP)37の付録Aにある「放射線源に対する単純な平板遮蔽体の設計による放射線防護の最適化の代数の例」を用いて、GAの動作状況を説明し、そして従来の複雑な微分計算による手法と比較して、GAの簡易性と有効性を確かめた。

第3章では、GA学習NNの原子炉異常診断システムへの応用について述べた。ニューラルネットワーク(NN)の原子炉異常診断への応用は、炉雑音解析法に基づいて、原子炉出力雑音のパワースペクトル分布に現れるピークやレベルの高低をNNで識別することによって、原子炉異常状態の診断を行うことが多い。しかし、NNは基本的に局所探索であり、解空間の現在点の近傍から次の探索点を探索する方法である。よって、局所解に落ち込みやすい、収束速度が遅いなど問題点がある。一方、GAは探索過程中、解空間上に複数の

探索点を設け、選択淘汰、交叉、突然変異など遺伝子操作によって次の探索点群を生成する。そこで、GAのこの全域的な多点探索の特徴を活かして、NNの問題点を改良するために、NNの学習手段にGAを用いた。

本研究に用いられたGA学習の実数表現法では、NNのパラメータ（ノードのしきい値とリンクの重み）をある一定の順序で並べ、得られた一次元の実数配列をGAの染色体とする。評価関数には、NNの学習誤差自乗和(TSSE)を用いる。進化過程の初期集団は、密度分布関数が e^{-x^2} である乱数系列によって発生する。遺伝子操作としては、ノードによる交叉とノードによる突然変異を取り入れた。

本研究は、GA学習NNの原子炉異常診断への応用の一例として、高速増殖実験炉「常陽」のシミュレータを用いて、制御棒異常振動と冷却材異常流動の診断を行った。学習させた二つのNNにそれぞれ検証パターンを与えて、ともに100%診断に成功することができた。また本研究は、比較のため、同じ構造の制御棒異常診断NNに対して、GA学習法と2種類のバックプロパゲーション法（逐次修正法と修正モーメント法）との学習効率の比較を行った。比較から、GA学習法は局所解に落ち込みにくい、学習精度が高い、またある一定の世代に至ってからの収束速度が速くなることがわかった。このことから比較に使用した2つの方法より正確に診断することが可能であった。問題が複雑性になると、これらの利点がより顕著になることが期待できる。

第4章では、放射線被曝作業の作業員最適配置問題へのGAアプローチについて述べた。放射線防護に関する最適化問題は、従来主に費用－便益解析法に基づいて取り上げられてきた。しかし、放射線防護の実施における現実的な問題においては、顧慮すべき制約条件が多く、莫大な探索空間をもたらす。その上、金銭で換算し難い条件もあるし、互いに矛盾する条件が存在する可能性もある。単一の金銭という評価基準による最適化が難しいであることが普通である。本研究は、GAが複数点探索ができること、問題に対して厳密な数学表現を必要としないこと、最適解探索に発見的な考えやエキスパートの知見を容易に取り入れることができるなどの特徴を利用して、放射線作業員の作業配置の最適化問題に対して適切な進化モデルを提案した。

本研究は、実際の配置中に考慮すべき制約条件に基づいて、放射線作業配置モデルに次のような制約条件を考えた：1)各作業の作業時間に関する要求；2)作業員の線量限度の制限；3)作業場所の線量拘束値の制限；4)集団線量を最小化する要求；5)作業員の作業時間の制限；6)特殊技能の要求；7)悪環境の作業時間の制限；8)作業経験の要求；9)作業中の作業場所移動を最小化する要求。

GAを適用するときに、探索空間を縮小するために、ハードな制約条件の概念を取り入れた。ハードな制約条件は、進化過程中すべての染色体が満足しなければならない条件である。それ以外の条件をソフトな制約条件とし、問題に対する重要度によって優先度をつけた。作業場所×作業員の二次元行列をGAの染色体とした。評価関数として、優先権順序で以下の二つの関数を用いた：a)違反された制約条件の違反の程度にそれぞれの優先度を乗じたものの総和；b)作業中作業場所移動の回数。遺伝子操作には、3種類の突然変異と1種類の交叉を取り入れた。ここに用いられた突然変異は、親染色体のサブマトリックスを再配置することによって行うことが特徴である。また、ハードな制約条件を維持するため、初期化過程と遺伝子操作にそれぞれの修正アルゴリズムを取り込んだ。

本手法を20人の作業員を10ヶ所の作業場所に、および12人を5ヶ所に配置する問題に適用し、その有効性を確かめた。また、目標計画法およびシプレックス法と比較することによって、GAアプローチが、放射線防護管理者にとってはより望ましい手法であること

とを確認した。本手法によって、GA は制約条件の厳しい問題にも適用できることを証明し、GA は原子力工学分野の数多くの最適化問題に応用できることを示す。

第5章は結論であり、本論文の各章において得られた結果を総括している。

本研究は、遺伝的アルゴリズム特有な全域的な多点探索手法を利用し、原子炉異常診断システムと放射線被曝作業の最適化配置問題に適用した。そして、それぞれの従来の方法との比較によって、GA の優越性を示した。それらの応用を通じて、GA は原子力工学分野にも十分通用できることを確かめた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 成 田 正 邦

副 査 教 授 榎 戸 武 揚

副 査 教 授 沢 村 貞 史

副 査 教 授 成 田 裕 一 (秋田大学大学院工学系研究科)

学位論文題名

遺伝的アルゴリズムの原子炉異常診断および 放射線防護最適化への応用

原子力システムにおいては、多くの制約のもとで近似的な最適解や最良の探索解を必要とすることが多い。その中でも、原子炉の異常診断と放射線防護の最適化は、現在の最も重要な探索問題の2つの例である。本論文では、この2つの例に、最近、活発に研究されている遺伝的アルゴリズム (GA) を適用したものである。

遺伝的アルゴリズムは、生物遺伝子の次世代への伝達を模擬した、確率的探索法の一つであり、多点探索の新しい最適化または探索手段である。原子力工学へのGA応用は、最近活発化してはいるが、特有用な探索能力を発揮できる問題への応用例はまだ非常に少ない。本論文では、原子炉異常診断システムにGAで学習させたニューラルネットワークを診断手段として用い、また被曝作業場所の作業員配置最適化問題に複数の評価関数とハードな制約条件を用いた遺伝的アルゴリズムを適用した。それらの応用を通じて、原子力工学分野における遺伝的アルゴリズムの有効性を証明している。

本論文は5章から構成されている。1章、2章は研究背景とGAの概要を放射線の平板遮蔽体遮蔽板の厚さ決定を例に説明したものである。著者の独自のGAの応用は、3章と4章に示されている。

3章では、GAを学習手段としたニューラルネットワーク (NN) の原子炉異常診断システムへの応用について述べている。診断方法は、原子炉出力記録に現れる異常雑音を検出することである。出力信号のパワースペクトル分布に現れるピークや形状のパターンをNNで識別することによって、原子炉状態の診断を行う。この際、NNが局所探索に陥ることを避けるために、NNの学習手段としてGAを利用している。GAを学習手段に使用するために、NNのノードとリンクの1次元配列法、評価関数、初期集団の発生などに独自の方法を導入している。このような独自の方法を用いた結果、高速実験炉「常陽」シュミレータによる2つの実験、制御棒異常振動と冷却材異常流動の診断に100%の診断を得

ている。

比較のために行った、同じ構造の制御棒異常診断 NN に対して、GA 学習法はバックプロパゲーション法と比べて局所解に落ち込みにくい、学習精度が高い、またある一定の世代に至ってから、収束速度が速くなるという知見が得られている。

4 章では、放射線被曝作業の作業員配置最適化問題へ GA を適用している。国際放射線防護委員会は、放射線防護体系は正当化、最適化、線量限度の順に充たされなければならないと勧告している。最適化は 2 番目に充たすべきであり、これには、従来、主に費用—便益解析法に基づいて行われてきた。

本論文は GA が複数点探索ができること、問題に対して厳密な数学表現を必要としないこと、最適解探索に発見的な考えやエキスパートの知見を容易に取り入れることができるなどの特徴を利用して、放射線作業員の作業配置の最適化問題に対して適切な進化モデルを適用し成功している。

実際の作業員の配置中に考慮すべき制約条件は非常に多いが本論文では 9 個の制約条件に基づく例を解析している。GA の染色体は二次元行列を採用している。評価関数は、優先権順序をつけたの二つの関数を用いている。進化過程中すべての染色体が満足しなければならない条件をハードな制約条件として取り入れ、探索空間を縮小することに初めて成功している。それ以外のソフトな制約条件には、問題に対する重要度によって優先度をつけている。また突然変異は、親染色体のサブマトリックスを再配置することによって行うという試みも行っている。

以上のような新しい試みを、放射線作業員の作業場所配置問題に適用し成功している。その結果は、目標計画法およびシプレックス法と比較することによって、GA アプローチが、放射線防護管理者にとっては望ましい手法であることを示している。

第 5 章は結論である。

以上のように本論文は、遺伝的アルゴリズムを原子炉異常診断の雑音スペクトルのパターン認識のための学習手段に用いて良好の結果を導き、また放射線作業の最適配置問題にも適用して実用上、他の手法に比較して迅速に近似解が見つかることを示したもので原子力工学及び数理解析学の進歩に寄与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。