

京都大学	博士 (工学)	氏名	林 和希
論文題目	Reinforcement Learning for Optimal Design of Skeletal Structures (強化学習を用いた離散構造物の最適設計)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文では、機械学習の1つの手法である強化学習を用いて、線材で構成される離散構造物であるトラスと骨組構造の力学的性能を最適化するための方法を提案したものであり、6章からなっている。各章の要旨は以下のとおりである。</p> <p>第1章は序論であり、構造最適化と構造設計への機械学習の適用に関するこれまでの研究を概観し、特にトラスのトポロジー (部材配置) 最適化と骨組構造の断面最適化に強化学習を用いることの利点について考察するとともに、本論の目的と構成を示している。</p> <p>第2章では、本論で提案する手法の基礎となるマルコフ決定過程と強化学習の概要を述べている。TD 学習 (現在の状態での価値関数の推定値を用いて価値関数を学習するアルゴリズム) に分類される強化学習手法である SARSA と Q 学習 (行動価値を学習するためのアルゴリズム) の概要を述べ、多くの状態と方策が存在する問題に対して、最適な方策を導くパラメータを学習するためのニューラルネットワークを用いた深層 Q ネットワークを解説するとともに、3章で提案する方法との関連をまとめている。</p> <p>第3章では、トラスや骨組構造の最適化の各ステップでの設計、設計変更、設計変更のための評価関数を、それぞれ強化学習での状態、行動、報酬としてとらえて、構造最適化問題を強化学習の問題に変換するための手法を提案している。また、トラスと骨組構造をグラフ構造としてモデル化し、構造最適化過程での状態を節点と部材の特徴量で定められるベクトルとして表現するため、グラフ埋め込みを用いた方法を提案している。その方法では、特定の部材の特徴量ベクトルを、近傍の節点と部材の特徴量を組み込んで生成することにより、周辺の節点と部材の特性を考慮することができる。また、特徴量ベクトルは部材の接続関係によらず同一のサイズで埋め込むことができるため、強化学習で訓練したモデルを異なる節点数と部材数を有する構造物にも適用することが可能である。さらに、提案手法の概要を簡単なモデルを用いて解説し、グラフの接続行列を用いてグラフに含まれる全ての部材の特徴量を一度の演算処理で計算する方法を提案している。部材の特徴量ベクトルを用いて、除去あるいは断面を変更する部材を決定する過程についても、行列計算で高速化している。本章で提案した手法は、4章と5章のそれぞれの問題に対して報酬の誤差関数を定義して、それを最適化することによって学習するための一般的な枠組みとして用いられる。</p> <p>第4章では、3章で提案した手法を、トラスの応力と変位に関する制約の下で部材体積を最小化するトポロジー最適化問題に適用している。その手法では、存在する部材には一様な断面積、存在しない部材には微小な断面積を与えて部材を逐次除去し、最適なトポロジーを求める。部材除去の過程をグラフ埋め込みを用いた強化学習によって学習した結果は、トラスのサイズ、荷重条件と境界条件に依存せず、小規模トラスでの学習結果を大規模トラスに適用できることを示している。本手法は、対象とするモデルごとに学習しなければならない従来の機械学習の問題点を解決する新しい手法である。また、学習率などのハイパーパラメータの学習精度に対する影響を考察し、特徴量ベクトルを導出するためのパラメータをニューラルネットワークで用いられる手法により最適化している。さらに、トラスのトポロジーと節点位置の同時最適化において、部材や節点が消滅して解析が困難になる問題点を解決するため、張力構造の形状解析で用いられる軸力密度法に基づく方法を提案している。本手法では、節点位置、部材断面積、支点反力、剛性指標であるコンプライアン</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	林 和希
<p>スの全てを軸力密度のみの関数で表すことにより、節点位置と部材断面積を変数とする既往の最適化手法に比べて少ない変数と計算量で最適解を得ることができる。また、荷重作用点の数だけ必要となる制約条件を2乗ノルムにより1つの制約にまとめることで、最適化に必要な計算量をさらに低減することができる。さらに、軸力密度法を用いたトラスの最適化において初期解のトポロジーの生成に強化学習による学習結果を用いることで、設計変数の数を減らし、疎な部材配置の最適解をより少ない計算負荷で求めるための複合的な手法を提案している。</p> <p>第5章では、3章で提案した手法を、鋼構造平面骨組の断面最適化に適用している。部材断面をあらかじめ与えられたリストから選択し、静的荷重の下での応力、変位と柱梁耐力比の制約の下で部材体積を最小化している。このような複雑な組合せ最適化問題に対して、学習したエージェントが近似最適解を求める能力を有することを確認している。4章と同様に、この手法で得られたエージェントも骨組の規模に依存せず、小規模骨組での学習結果を大規模骨組に適用して、少ない計算時間で設計条件を満たし目的関数値が十分に小さい解を得ることができる。その過程において、スパン数や層数が異なる場合でも、適切な方策を選択できることを確認している。また、学習に用いなかった骨組に対して、骨組断面を上限値から逐次減少させる方法と下限値から逐次増加させる2つの方法を適用できることを示している。</p> <p>第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、機械学習の 1 つの手法である強化学習を用いて、線材で構成される離散構造であるトラスと骨組構造の力学的性能を最適化するための方法を提案している。以下、その内容と得られた結果を記す。

(1) トラスや骨組構造の最適化の各ステップでの設計、設計変更、設計変更のための評価関数を、それぞれ強化学習での状態、行動、報酬としてとらえて、構造最適化問題を強化学習の問題に変換するための手法を提案した。また、グラフ埋め込みの手法を導入し、特定の部材の特徴量ベクトルを、近傍の節点と部材の特徴量を組み込み生成することにより、周辺の節点と部材の特性を考慮できるモデルを提案した。

(2) トラスの部材を逐次的に除去して最適なトポロジー（部材配置）を求める問題に対して上記(1)の手法とモデルを適用し、部材除去による応力や変位などの力学的特性量の変化を繰り返し観測して、構造物の状態からそれぞれの部材を除去する価値を予測する手法を提案した。また、部材の特徴量ベクトルや部材除去の価値関数を導出するためのハイパーパラメータをニューラルネットワークで用いられる手法によって最適化した。さらに、小規模トラスの学習結果を用いて、さまざまなサイズ、荷重条件と境界条件のトラスの近似最適トポロジーが得られることを示した。

(3) トラスのトポロジー最適化において、部材や節点が消失して解析が困難になる問題点を解決するため、張力構造の形状解析で用いられる軸力密度法を用いた方法を提案した。本手法は、節点位置、部材断面積、支点反力、剛性指標であるコンプライアンスの全てを軸力密度のみの関数で表し、節点位置と部材断面積を変数とする既往の方法に比べて少ない変数と計算量で最適解を得ることができる。また、荷重作用点の数だけ必要となる制約条件を 2 乗ノルムにより 1 つにまとめることで、最適化に必要な計算量をさらに低減した。

(4) 建築骨組の構造設計過程を単純化したモデルを強化学習により学習し、さまざまな設計条件を満足する設計解を求めるエージェントを作成する手法を提案した。上記(2)と同様に、この手法で得られたエージェントも骨組の規模に依存せず、小規模の骨組で学習した結果を大規模の骨組に適用することができる。また、骨組断面を上限値から逐次減少させる場合と下限値から逐次増加させる 2 つの場合について、学習に用いなかった骨組において設計条件を満たし目的関数値が十分に小さい骨組が生成できることを示した。

本論文は、トラスと骨組構造の特性を最適化するための強化学習に基づく手法を提案したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 3 年 1 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。