

京都大学	博士 (工学)	氏名	Chi-tathon Kupwivat
論文題目	Optimization of Trusses and Frames using Reinforcement Learning (強化学習を用いたトラスと骨組の最適化)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文では、深層決定論的方策勾配法 (Deep deterministic policy gradient, DDPG) に基づく強化学習を用いて、トラス構造と骨組構造の力学的性能を指標として部材断面、部材配置と形状を最適化するための方法を提案したものであり、7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、構造最適化における機械学習の適用に関するこれまでの研究を概観し、とくにトラス構造と骨組構造の最適化における強化学習の有効性について考察するとともに、本論文の目的と構成を示している。</p> <p>第2章では、機械学習の基本的考え方と強化学習の方法を概説している。とくに、本論文で提案する最適化手法の基礎となる DDPG と、強化学習の基本構成要素である Actor-Critic 法について解説し、第6章の多目的構造最適化で用いるマルチエージェント DDPG のアルゴリズムを示している。また、トラス構造と骨組構造の節点と部材の特徴量をベクトルで表現するためのグラフ埋め込みで用いる各種の行列を定義し、第3章以降での強化学習の基盤となるニューラルネットワークにおける学習方法の概要を示している。</p> <p>第3章では、トラス構造と骨組構造をグラフ構造としてモデル化してグラフ畳み込みネットワーク (GCN) により特徴量ベクトルを生成する手法を拡張し、ブレースを有するラチスシェル構造の部材・節点接続関係および節点と部材の特徴量をそれぞれ隣接行列、頂点特徴行列、重み付き隣接行列で表現する手法を提案した。GCN と DDPG を用いたひずみエネルギー最小化過程の学習結果は、ラチスシェルのサイズ、荷重条件と境界条件に依存せず、小規模の構造で学習したエージェントを大規模構造の最適化に適用できるため、少ない学習時間で大規模構造の最適化が可能である。提案した方法を、静的鉛直荷重を受けるラチスシェルの各グリッドに存在するブレースの方向を 0-1 変数としたひずみエネルギー最小化問題に適用し、遺伝的アルゴリズム (GA) あるいは総列挙法と同等の解を、少ない解析回数で得ることができることを確認した。また、提案した手法をラチス部材の断面を最適する問題に適用し、GA および焼きなまし法よりも少ない解析回数で優れた解を求めることができることを示した。</p> <p>第4章では、平面骨組構造を対象として、静的地震荷重に対する部材端応力と層間変形角に関する制約の下で、部材断面とブレースの種類および配置を同時に最適化する過程を GCN と DDPG を用いて学習するため、部材と接合部をそれぞれグラフの頂点と辺で表現する手法を提案した。このモデル化により、部材の応答量も含めた力学的および幾何学的特徴量を頂点特徴行列で表現し、部材の断面とブレースの種類および配置をグラフの頂点を用いて直接変更することができる。目的関数である部材体積と、応力および層間変形角の制約関数の変化から報酬を定義し、ブレースが存在せず断面寸法が最小値をとるモデルを初期解として、小規模の骨組でブレースの追加あるいは断面サイズの増加の過程を学習することにより、大規模骨組の最適化において、GA より少ない計算量で優れた解が得られることを検証した。ここで、多数のブレースが存在する最適解が得られることを防ぐため、ブレースには梁・柱より大きいコスト係数を与えている。提案した手法によると、異なる乱数の初期値を用いて最適化を複数回</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	Chi-tathon Kupwivat
------	---------	----	---------------------

実行したときの目的関数値のばらつきは小さく、優れた近似最適解を確実に求めることができる。

第5章では、ラチスシェル構造の形状を、パラメトリック曲面の一つであるベジエ曲面で定義し、その形状制御点の高さを変数としてひずみエネルギーを最小化する形状最適化問題に対し、Graph attention network (GAT)とDDPGを用いた方法を提案した。その方法では、ラチスシェルの節点と部材に加えて、形状制御点および制御ネットの接続関係を、それぞれグラフの頂点と接続行列で表す。このような並列的かつ複合的な表現により、ラチスシェルの構造特性と曲面形状の関係をモデル化し、ひずみエネルギーを最小化するような形状を生成する過程を学習できる。この手法でも、小規模の構造で学習したエージェントを用いて、支持条件や荷重条件が異なる大規模構造の形状最適化が可能である。また、Global sum pooling (GSP)を用いて、ニューラルネットワークの出力ベクトル量をスカラー化することにより、最適化の過程で形状制御点の高さを同時に変更できる。数値例題では、さまざまな規模のラチスシェルを最適化し、粒子群最適化手法および焼きなまし法よりも優れた解を、同じ解析回数で求められることを確認した。

第6章では、マルチエージェント DDPG による強化学習を用いた多目的構造最適化手法を提案した。その手法では、最適化の対象とするトラス構造の節点および部材に加えて、目的関数空間でのパレート解集合もグラフ構造で表現し、目的関数の改善量、パレート解集合がなす領域のHypervolumeとその増加量および、パレートフロントの長さとおよびパレート解の間隔の均一性を表す指標を用いて報酬を定義する。また、パレート解の近傍解を逐次的に生成し、それらを含む集合からパレート解を抽出して更新する。数値例題では、単純な2変数の数学例題において、提案した手法で得られる解の精度を検証した後、小規模トラスの例で多目的GAよりも優れた解を同等の解析回数で得られることを示した。また、橋状トラスの例で、小規模モデルでの学習結果を大規模モデルに利用できることを確認した。

第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の展望について述べている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、機械学習の一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構造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) トラス構造と骨組構造をグラフ構造としてモデル化してグラフ畳み込みネットワーク (GCN) により特徴量ベクトルを生成する手法を拡張し、ブレースを有するラチスシェル構造の部材・節点接続関係および節点と部材の特徴量をそれぞれ隣接行列、頂点特徴行列、重み付き隣接行列で表現する手法を提案した。GCN と DDPG を用いたひずみエネルギー最小化過程の学習結果は、構造のサイズ、荷重条件と境界条件に依存せず、小規模の構造で学習したエージェントを大規模の構造に適用できる。提案した方法を、ラチスシェルのブレース配置最適化問題とラチス部材断面最適化問題に適用し、遺伝的アルゴリズム (GA) および焼きなまし法に対する優位性を確認した。

(2) 平面骨組を対象として、静的地震荷重に対する応答量に関する制約の下で部材断面とブレース配置を同時に最適化する過程を GCN と DDPG で学習するため、部材と接合部をそれぞれグラフの頂点と辺で表現する手法を提案した。このモデル化により、部材の特性をグラフの頂点を用いて直接変更することができる。目的関数である部材体積と、応力および層間変形角の制約関数の変化から報酬を定義し、ブレースが存在せず断面寸法が最小値をとるモデルを初期解としてブレースの追加あるいは断面寸法の増加の過程を学習することにより、GA より少ない計算量で優れた解が得られることを検証した。

(3) Graph attention network (GAT) と DDPG を用いたラチスシェルの形状最適化において、形状をベジエ曲面で定義し、その形状制御点および制御ネットの接続関係をグラフの頂点と接続行列で表し、Global sum pooling (GSP) を用いて制御点の高さを同時に変更して最適化する手法を提案した。

(4) マルチエージェント DDPG による強化学習を用いた多目的構造最適化手法を提案した。その手法では、パレート解集合もグラフで表現し、パレート解集合がなす領域の Hypervolume とパレート解の分布特性を報酬の指標とする。また、パレート解の近傍解を逐次的に生成し、それらを含む集合からパレート解を抽出して更新する。単純な 2 変数の数学例題で得られる解の精度を検証した後、小規模トラスの例で多目的 GA に対する優位性を確認し、橋状トラスの例で、小規模モデルでの学習結果を大規模モデルに利用できることを確認した。

本論文は、強化学習を用いてトラスと骨組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、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 6 年 1 月 1 8 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。