

令和 5 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K20461

研究課題名（和文）離散構造物の最適設計に向けたグラフ埋め込みと機械学習の複合手法の開発

研究課題名（英文）Development of a combined method of graph embedding and machine learning for optimal design of skeletal structures

研究代表者

林 和希（Hayashi, Kazuki）

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：80908757

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：離散構造物を対象としてより複雑かつ大規模な設計問題に対する最適解を少ない計算負荷で得るために、グラフ埋め込みの定式化手法や機械学習アルゴリズムを改良し、より効率的かつ汎用性の高い構造最適化ワークフローを開発した。トラス、鋼構造骨組、ラチスシェル、カーブベンディング構造といった多様な構造物に対するグラフモデル化・グラフ埋め込みの適用を試み、当初の目標であった「より効率的かつ汎用性の高い構造最適化ワークフロー」を構築できることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工知能技術は、入力・出力するデータのトポロジー（データ同士がどのような接続関係を以て連関しているか）を機械学習モデルの中で明示的に考慮することによって性能を劇的に向上させており、データのトポロジーに着目した機械学習手法は幾何学的深層学習という領域でも活発に研究されている。本研究は、建築構造物の部材の複雑な接続関係を明示的に考慮した幾何学的深層学習モデルを構築することにより、機械学習モデルの性能の大幅な向上を実現した。建築分野から独自の機械学習モデルを構築した学術的意義を有するだけでなく、人工知能技術を用いて安全で安心な構造物を効率的に設計するための萌芽的成果であり、大きな社会的意義を有する。

研究成果の概要（英文）：In order to obtain optimal solutions for complex and large-scale design problems for discrete structures with less computational effort, the formulation of graph embedding and machine learning algorithms have been improved. This improvement contributed to developing more efficient and versatile structural optimization workflows. The improved graph modeling and graph embedding methods are applied to various structures such as trusses, steel structural frames, lattice shells, and kerf-bending structures, and demonstrated the efficacy, efficiency, and versatility of the structural optimization workflow encapsulating the proposed method.

研究分野：建築構造最適化

キーワード：構造最適化 機械学習 グラフ埋め込み 幾何学的深層学習 離散構造物

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

応募者の専門分野である構造最適化はコンピュータの高い計算能力を駆使して、制約条件・目的に適った構造物を得る技術である。最適化手法には目的・制約関数の勾配にもとづく数理計画法や、近傍解を繰り返し生成する発見的な手法が主に用いられてきた。ただし、これらは膨大な繰り返し計算を必要とし、汎用の PC を用いて大規模な構造モデルに対する最適解を得るためには多大な計算時間を要する。したがって、構造最適化における重要な研究課題は、人間の直感だけでは設計が困難な設計問題に対して設計者に最適解を即座にフィードバックできる高い計算効率の実現である。

このような状況において、応募者はトラスや骨組といった離散構造物を頂点とエッジからなるグラフと呼ばれるデータ構造とみなし、グラフ埋め込みと呼ばれる部材の複雑な接続関係がなす力の伝達を考慮できる特徴量の抽出手法と強化学習を組み合わせた機械学習モデルを考案した。この機械学習モデルは支持・荷重条件を与えて不要部材を除去する平面トラスの位相最適化や、制約の範囲内で部材断面を小さくする平面骨組の断面最適化に対して高い性能を発揮するが、大規模な三次元構造物に対してはグラフ埋め込みの入力が複雑化することに加え、強化学習は逐次的な意思決定プロセスを対象とした学習手法のため、既往技術の性能は限定的である。以上の知見から、グラフ埋め込みや機械学習手法を改良して「より難しい設計問題に対して設計者と機械学習モデルが協働して設計できるワークフロー開発できないか？」という「問い」に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、離散構造物を対象としてより複雑かつ大規模な設計問題に対する最適解を少ない計算効率で得るために、グラフ埋め込みの定式化手法や機械学習アルゴリズムを改良し、より効率的かつ汎用性の高い構造最適化ワークフローを開発することにある。このワークフローにより、コンピュータと設計者が協働して構造性能・施工性に優れた建築構造物を効率的に設計することが可能となる。

本研究の独自性・創造性は以下の二点にある。(A) グラフ埋め込みを改良し、構造物全体の構造性状を考慮した特徴量を独自の数理モデルによって獲得する。(B) 得られた特徴量を強化学習以外の機械学習手法に利用することで、構造最適化の効率性を改善し、構造設計を支援する設計エージェントを生成する試み。構造設計を支援するエージェントを開発できれば設計プロセスに関する作業量の削減や低コスト化に極めて有効である。

3. 研究の方法

グラフ埋め込み手法の改良

まず、応募者がこれまで定式化してきたグラフ埋め込み手法の改良を行う。グラフ埋め込みは情報学分野で大規模グラフを取り扱うことができるよう手法の改良が進められており、新しい特徴抽出手法が現在も提案されている。弾性域に留まらない構造物の非線形形状や三次元的な幾何学的情報をより正確に捉えられるようプログラムを修正する。

構造物全体の特徴量の抽出法の定式化

これまでは部材の特徴抽出に特化したグラフ埋め込み手法のみを取り扱っていたが、構造物全体の特徴量を抽出できる手法を新たに開発する。新たに開発した手法は実構造物を想定した数値例題を用いてシミュレーションを行い、その有効性を明らかにする。

機械学習手法の拡張

グラフ埋め込み手法の改良と並行して、グラフ埋め込みを強化学習以外の機械学習手法に拡張する。例えば、教師あり学習にグラフ埋め込みを拡張して設計変数と構造型状の因果関係を学習させる。あるいは、教師なし学習に分類されるクラスタリングにグラフ埋め込みを拡張することで様々な設計を構造型状ごとに自動で分類する。訓練した機械学習モデルは最適化における解探索に利用する。

4. 研究成果

研究期間全体を通してトラス、鋼構造骨組、ラチスシェル、カーブベンディング構造といった多様な構造物に対するグラフモデル化・グラフ埋め込みの適用を試み、当初の目標であった「より効率的かつ汎用性の高い構造最適化ワークフロー」を構築できることを実証した。

(1) 各部材の断面サイズを所定のリストから選択する鋼構造平面骨組の離散断面最適化問題を対象として、グラフ埋め込みと強化学習を組み合わせた手法を適用した。強化学習エージェントは、応力・変位・柱梁耐力比などさまざまな実用的な制約の下で、総構造体積を最小化するために訓練を行った。グラフ埋め込みは、接続が不規則なデータから特徴を抽出する手法であり、特に申請者が提案したグラフ埋め込み手法は節点と部材の入力を同時に扱って部材の特徴量を得ることができる数少ない手法であることを既往文献の調査から確認した。

提案したグラフ埋め込みの演算によって、強化学習エージェントは骨組の構造規模によらず同一サイズの特徴ベクトルを抽出でき、接続関係を考慮した柱梁部材の構造型状を把握できるようになった。訓練済のエージェントは断面設計の計算コストと設計品質の両方の面において、ベンチマークとして採用した粒子群最適化手法よりも優れた結果が得られることを数値例題を通じて確認した。また、これまで検討してこなかった層ごとにスパンの異なる複雑な骨組モデルに対しても訓練済エージェントが有効に作用することが確認できた。

(2) トラスの線形構造解析から得られる柔性の指標コンプライアンスを予測するために、トラス全体の特徴量を予測する数理モデルを構築した。この予測モデルは全ての節点・部材の入力を全結合して単純な関数近似モデルであるマルチレイヤパーセプトロンに入力して得られる予測結果と比べて良い予測精度を発揮した。したがって、提案するグラフ埋め込みモデルが離散構造物の性状をより正確に把握できるモデルであることが確認できた。

(3) 前年度に改良を行ったグラフ埋め込み手法を利用し、施工途中で支保工の数が少なくなるよう立体トラスの部材の施工順序を最適化するという実用的な問題に対する強化学習アプローチを提案した。既往の遺伝的アルゴリズム(GA)や共分散適応進化戦略(CMA-ES)といった最適化手法と比較して数千倍の速度で近似最適解が求められることを大規模なトラスモデルを用いて例証した。

(4) グラフ埋め込み手法を強化学習だけでなく他の機械学習手法に適用したケーススタディも行った。例えば、軸力を負担する細い部材を組み合わせることで空間を覆うラチスシェル構造が鉛直方

向の荷重を受けて変形する際の非線形挙動の度合いを表す指標である弾性座屈荷重低減係数を予測するため、グラフ埋め込みと教師あり学習を用いた手法を提案した。数値例題を通して、学習に用いなかったラチスシェルモデルに対しても高い予測精度を発揮することを確認できた。

(5) 材料の一部を削って柔軟な曲げ機構を得るカーフベンディングの構造モデルをグラフ構造で表現する手法を提案し、さらにシミュレーションと3Dプリンター・レーザーカッターを用いたプロトタイピングを通じて、提案する構造モデルが実挙動と一致することを確認した。カーフベンディングの構造的性状をグラフ埋め込みで捉えるまでには至っていないが、実挙動に近いモデルをグラフで表現できたことは、本研究プロジェクトで開発した汎用的なグラフ埋め込みモデルを用いて、複雑な切削パターンをもつカーフベンディング構造の特徴を機械学習によって捉えられる可能性を示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Hayashi Kazuki, Ohsaki Makoto	4. 巻 51
2. 論文標題 Graph-based reinforcement learning for discrete cross-section optimization of planar steel frames	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Engineering Informatics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.aei.2021.101512	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kupiwat Chi-tathon, Hayashi Kazuki, Ohsaki Makoto	4. 巻 8
2. 論文標題 Deep deterministic policy gradient and graph convolutional network for bracing direction optimization of grid shells	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Built Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fbuil.2022.899072	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hayashi Kazuki, Ohsaki Makoto, Kotera Masaya	4. 巻 63
2. 論文標題 Assembly Sequence Optimization of Spatial Trusses Using Graph Embedding and Reinforcement Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures	6. 最初と最後の頁 232 ~ 240
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20898/j.iass.2022.016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Zhu Shaojun, Ohsaki Makoto, Hayashi Kazuki, Zong Shaohan, Guo Xiaonong	4. 巻 16
2. 論文標題 Deep reinforcement learning-based critical element identification and demolition planning of frame structures	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers of Structural and Civil Engineering	6. 最初と最後の頁 1397 ~ 1414
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11709-022-0860-y	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Kupwiwat Chi-tathon、Hayashi Kazuki、Ohsaki Makoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Deep deterministic policy gradient and graph attention network for geometry optimization of latticed shells	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Intelligence	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10489-023-04565-w	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 KUPWIWAT Chi-tathon、IWAGOE Yuichi、HAYASHI Kazuki、OHSAKI Makoto	4. 巻 69B
2. 論文標題 Deep deterministic policy gradient and graph convolutional networks for topology optimization of braced steel frames	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Structural Engineering B	6. 最初と最後の頁 129 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijse.69B.0_129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 部材の逐次的な付加・除去過程を訓練した強化学習エージェントによる平面 トラスの位相最適化
3. 学会等名 第44回情報・システム・利用・技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小寺 正也, 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 安定性の評価とグラフ埋め込みによるトラスの施工経路の強化学習
3. 学会等名 第44回情報・システム・利用・技術シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 グラフ埋め込みと機械学習による単層ラチスシェルの弾性座屈荷重低減係数の予測
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Hayashi and Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Knowledge extraction of discrete cross-section optimization of planar steel frames using graph-based reinforcement learning
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 離散構造部材の特徴量を抽出するためのグラフ埋め込みを用いた機械学習モデル
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Hayashi and Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Graph and machine learning-based approach to prediction of ultimate load of latticed shells considering geometric nonlinearity
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Hayashi, Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Knowledge extraction of discrete cross-section optimization of planar steel frames using graph-based reinforcement learning
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (ACSMO) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chi-tathon Kupiwat, Kazuki Hayashi, Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Topology optimization of braced latticed shells using deep deterministic policy gradient and graph convolutional network
3. 学会等名 Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (ACSMO) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 離散構造部材の特徴量を抽出するためのグラフ埋め込みを用いた機械学習モデル
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 グラフ埋め込みと機械学習による単層ラチスシェルの弾性座屈荷重低減係数の予測
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chi-tathon Kupwiat, Kazuki Hayashi, Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Deep deterministic policy gradient and graph convolutional network for geometry and topology optimization of braced latticed shells
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Hayashi, Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Graph and machine learning-based approach to prediction of ultimate load of latticed shells considering geometric nonlinearity
3. 学会等名 15th World Congress on Computational Mechanics (WCCM-XV) 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (APCOM-VIII) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中里 桂也, 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 グラフ埋め込みと機械学習を用いたトラスの外力仕事予測モデル
3. 学会等名 日本建築学会大会[北海道]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林 和希, 大崎 純
2. 発表標題 ベジエ曲線を用いたカーフベンディングのスリットパターンと梁要素による構造解析モデルの生成手法
3. 学会等名 日本建築学会大会[北海道]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Chi-tathon Kupwiat, Kazuki Hayashi, Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Geometry optimization of lattice shells using GAT-DDPG with Bezier surface
3. 学会等名 日本建築学会大会[北海道]
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Hayashi, Makoto Ohsaki, Masaya Kotera
2. 発表標題 Assembly sequence optimization of spatial trusses using graph embedding and reinforcement learning
3. 学会等名 IASS 2022 Symposium affiliated with APCS 2022 conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Makoto Ohsaki, Kazuki Hayashi, Chi-tathon Kupwiat
2. 発表標題 Reinforcement learning and graph representations for optimization of plane steel building frames
3. 学会等名 the 15th World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimisation (WCSMO2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Chi-tathon Kupwiat, Kazuki Hayashi, Makoto Ohsaki
2. 発表標題 Sizing optimization of free-form lattice shells using deep deterministic policy gradient and graph convolutional networks
3. 学会等名 IASS Symposium 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------