

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 2 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K18951

研究課題名（和文）離散事象システム理論によるデータに基づく離散最適化モデルの自動生成

研究課題名（英文）Automatic Generation of Discrete Optimization Model Using Input and Output Data Based on Discrete Event Systems Theory

研究代表者

西 竜志（Nishi, Tatsushi）

岡山大学・自然科学学域・教授

研究者番号：10335581

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、離散最適化問題の入出力データから離散最適化問題のモデルを推定し、そのモデルを離散事象システムに変換することで、モデル構造抽出を行って、仕様を満たす妥当な最適化モデルを構築するための離散事象システム理論を用いた新しい離散最適化技法を創成することを目的として、(i) データからの離散事象システムモデル生成手法の開発、(ii) データからの意思決定モデルの目的関数推定、(iii) データからの多目的スケジューリング問題の重み係数推定と化学プラントへの適用に関する研究を実施し、機械学習や逆最適化手法に基づき、精度の良い離散最適化モデル同定が実現可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoTやビッグデータの普及とともに、大規模データの取得は容易になってきている。データに基づく最適化モデルの推定が可能となれば、モデルの自動生成や自動最適化が可能となる。一方で多目的最適化問題では、目的関数のトレードオフ関係を持つため、データから目的関数や重み係数を推定することは容易でない。本研究では、離散最適化問題の一つである生産スケジューリング問題を対象として離散事象システム理論を用いた入出力データからの離散最適化モデルの自動生成において、選好解から目的関数推定や多目的関数の重み係数を化学プラントを対象とした実データで精度良く実現可能であることを示した点で学術的・社会的意義は極めて高い。

研究成果の概要（英文）：In this study, a discrete optimization model is estimated from the input/output data of the discrete optimization problems by using discrete event systems theory with conversion into a discrete event system to extract the model structure to satisfy the specifications. We conducted the following studies, (i) Development of discrete event system model generation method from data, (ii) Estimation of the objective function using machine learning, (iii) Estimation of weighting factors for multi-objective scheduling problems from data and its application to chemical plants. The results show that an accurate discrete optimization model identification is feasible based on machine learning and inverse optimization methods.

研究分野：システム最適化

キーワード：離散最適化 スケジューリング モデル同定 機械学習 ニューラルネットワーク 目的関数推定 逆最適化 重み係数推定

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

近年のビッグデータ解析や人工知能技術の進展とともに、多量のデータに基づく大規模システムの離散最適化技法は今後ますます重要となってきた。一般に離散最適化問題を解くためには、決定変数の選択、制約条件の記述、目的関数の設定が必要である。すなわち、対象とするシステムの物理現象や社会的原理を用いて、実システムの挙動を正確に表現し、問題の本質を表す最適化モデルの構築が必要となる。また、離散最適化モデルでは、求解しやすさの観点から、可能な限り求解しやすい数理モデルの構築が求められる。しかしながら、一般に最適化モデルの自動作成は容易ではない。たとえ精度の良い数理モデルが構築されたとしても、実システムに適用したとき、最適化モデルと実システムのモデル化誤差を生じることがある。以上から、従来の最適化技法を実問題に適用するとき、妥当な最適化モデルや解法の選択には、専門家の知識や人間による判断が必要となる。また、最適化モデルが一度構築されたとしても、環境の変化により制約条件や目的関数に変更されると、最適化モデルの修正やアルゴリズムの変更が必要となり、従来の最適化手法では実問題への適応的な対応は難しい。近年では、機械学習や人口知能技術の発展により、大規模データから人間の意思決定における知識や感を機械で表現することが可能となってきた。

そこで、研究では、入出力データから妥当な離散最適化モデルを自動生成するための方法論を開発することを目的とする。入出力データと離散最適化モデルが与えられたとき、データと整合する最適化モデルの係数を求める問題は逆問題と呼ばれる。データに基づく数理モデルの構築には、統計モデルやニューラルネットワークモデルが一般に利用される。しかしながら、これらのモデルでは、得られた結果の因果関係を説明することは容易ではない。妥当な最適化モデルには、実行可能解の存在や遷移関係の実システムとの整合性の保証が求められる。本申請では、与えられた逆問題を解くことによって得られた離散最適化モデルをペトリネットなどの離散事象システムに変換し、グラフ構造や代数構造などから問題構造の特徴付けを行う。次に、到達可能性や活性を満たす範囲の中で不要な制約条件の除去やモデル縮約を行って、大量データから計算可能な最適化モデルを得るという離散事象システム理論を用いたデータに基づく離散最適化技法を創成する。

2. 研究の目的

本研究の目的は入出力データから離散最適化問題のモデルを推定し、そのモデルを離散事象システムに変換することで、モデル構造の抽出やモデル縮約等を行って、与えられた仕様を満たす妥当な最適化モデルを構築するための離散事象システム理論を用いたデータに基づく離散最適化技法を創成する。本手法をスケジューリング問題や配送計画問題などの実問題に適用し、その効果を検証する。

これを実現するために、以下の(1)から(3)に関する研究を行う。

- (1) 入出力データや意思決定表からルールを抽出し、制約条件や目的関数を同定する方法論構築
- (2) 得られた離散最適化モデルを離散事象システムに変換し、システムのグラフ構造や代数的性質からモデル構造の特徴付けを行うための解析手法の確立
- (3) 最適化モデルの検証と実システムへの適用による効果の検証

3. 研究の方法

1) 代表的な離散最適化問題に対するデータに基づく離散最適化モデルの同定

代表的な離散最適化問題である最短路問題、ナップサック問題、巡回セールスマン問題、配送計画問題など入出力データから離散最適化問題の目的関数や制約条件の係数を推定する手法を検討する。具体的には、遺伝的アルゴリズムや局所探索法などのメタヒューリスティクスを用いて、推定結果と出力データの誤差が規定値以内となるような数理計画モデルの係数を決定する最適化問題を求解する。

2) 入出力データからの生産スケジューリング問題における目的関数推定

具体的にはデータに基づく離散事象システムの同定手法に関する一般的な手法の一つである機械学習モデルによるブラックボックス同定手法を調査し、実用的な生産スケジューリング問題

の目的関数の同定を試みる。

3) 多目的スケジューリング問題における目的関数の重み係数推定手法と実データへの応用

最適化結果または実績データから機械学習や逆最適化アルゴリズムを用いて目的関数の重み係数を推定する手法を開発する。

4) 入出力データを利用した進化メカニズムを用いた群最適化手法

入出力データからの進化的意思決定モデルを構築し、それらに基づき探索性能を進化的メカニズムにより動的に変更することを可能とする群最適化手法を構築する。

4. 研究成果

1) 代表的な離散最適化問題に対するデータに基づく離散最適化モデルの同定

ブラックボックス同定手法を用いて、入出力データから巡回セールスマン問題やナップサック問題などの基本的な離散最適化問題の同定を試みた。その結果、従来のブラックボックス同定手法では入出力データが不足する場合に、すべての可能な組合せを列挙することが困難であることが判明した。フローショップスケジューリング問題の各機械での処理に要する時間や各仕事の技術的順序が既知のもとで、各機械での処理の開始時刻が与えられたとき、各機械での容量制約を同定する問題を整数計画問題として定式化した。この問題に対する厳密解法と近似解法を提案し、これらの解法の妥当性を検証した。厳密解法は小規模問題では適用可能であるが、大規模問題には適用が困難であることが判明した。近似解法は実用的な計算時間で解を得ることができることを確認した。

2) 入出力データからの生産スケジューリング問題における目的関数推定

生産スケジューリング問題の例題とその出力から目的関数を判定するための手法として、機械学習モデルを用いた判定手法を開発した。未知のスケジュールに用いられている目的関数の種類として、重み付き完了時刻和、重み付き納期遅れ和、重み付き遅れ仕事数、最大納期遅れ和、段取りコスト和を精度良く推定可能であることを明らかにした。データ前処理として特徴量の抽出方法を変えながら判定結果の比較を行い、候補となる目的関数値と順位相関係数をそれぞれ標準化した値を特徴量とする方法により、約90%程度の良い正答率が得られることを確認した。小規模問題で学習させたニューラルネットワークを用いて、実データ規模の目的関数判定を行い、提案手法の有効性と汎化性能を検証した。さらに、機械学習手法の違いによる結果の比較、機械学習を用いない簡易判定手法の検討を行った。その結果、本研究で提案したデータ前処理手法の下では、ニューラルネットワークを用いた判定でより正答率の良い結果が得られることを確認した。

3) 多目的スケジューリング問題における目的関数の重み係数推定手法と実データへの応用

多目的生産スケジューリング問題とその最適解から目的関数の判定するための手法として、機械学習モデルおよび逆最適化を用いた推定手法を開発した。それぞれの手法を用いることで重み付き完了時間と段取りコストの重み係数を精度良く推定可能であることを明らかにした。機械学習に用いる特徴量として、完了時刻のばらつきを機械学習モデルに組み込むことによって、より高い精度で精度程度の推定結果が得られることを確認した。逆最適化アルゴリズムにおいて、計算時間を短縮するために、離散最適化モデルの入出力データからニューラルネットワークを用いて順最適化モデルの代理モデルを構築することにより、逆最適化アルゴリズムの計算量を大幅に削減しながらも、精度の良い推定結果が得られることを確認した。化学プラントを対象とした大規模スケジューリング問題の実データを用いて機械学習手法と逆最適化手法による重み係数推定を行った結果、精度の良い推定結果が得られることを実データにより確認した。また、トレードオフを有する多目的スケジューリング問題の選好解が与えられたとき、複数の目的関数候補から妥当な目的関数選択と重み係数を決定する目的関数推定問題を定式化し、解を効率よく得るためのアルゴリズムを開発した。

4) 入出力データを利用した進化メカニズムを用いた群最適化手法

進化ゲーム理論の考え方に基づく粒子群最適化アルゴリズムを開発し、ベンチマーク問題による検証を行って、提案したアルゴリズムの様々な問題に対する有効性を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Hidetoshi Togo, Kohei Asanuma, Tatsushi Nishi	4. 巻 -
2. 論文標題 Estimating Weighting Factors Using Approximate Solutions of Multi-Objective Scheduling Problems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Scheduling 2021	6. 最初と最後の頁 30-32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ziang Liu, Tatsushi Nishi	4. 巻 -
2. 論文標題 Adaptive Comprehensive Learning Particle Swarm Optimization with a Parameter Control Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Scheduling 2021	6. 最初と最後の頁 66-68
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Liu Ziang, Nishi Tatsushi	4. 巻 582
2. 論文標題 Strategy dynamics particle swarm optimizer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Information Sciences	6. 最初と最後の頁 665 ~ 703
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ins.2021.10.028	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 西 竜志	4. 巻 59
2. 論文標題 機械学習と最適化の融合による共進化システム設計	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 922-925
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ziang Liu and Tatsushi Nishi	4. 巻 2020
2. 論文標題 Multipopulation Ensemble Particle Swarm Optimizer for Engineering Design Problems	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematical Problems in Engineering	6. 最初と最後の頁 1-30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2020/1450985	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Asanuma Kohei, Nishi Tatsushi	4. 巻 35
2. 論文標題 入出力データを用いた多目的スケジューリング問題の重み係数推定	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.35.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsushi Nishi, Shuhei Akiyama, Toshimitsu Higashi, Kenji Kumagai	4. 巻 Vol. 17, No. 2
2. 論文標題 Cell-based Local Search Heuristics for Guide Path Design of Automated Guided Vehicle Systems with Dynamic Multi-Commodity Flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automation Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 966-980
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASE.2019.2952920	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Matsuoka, Tatsushi Nishi, Kevin Tinerney	4. 巻 -
2. 論文標題 Machine Learning Approach for Identification of Objective Function in Production Scheduling Problems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 679-684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/COASE.2019.8843054	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kosei Nishida, Tatsushi Nishi, Hideki Kaname, Kenji Kumagai	4. 巻 -
2. 論文標題 Just-in-time routing and scheduling for multiple automated guided vehicles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics	6. 最初と最後の頁 841-846
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SMC.2019.8914493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsushi Nishi and Naoki Shimamura	4. 巻 8607741
2. 論文標題 Data-Based Identification Method for Jobshop Scheduling Problems Using Timed Petri Nets	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management	6. 最初と最後の頁 1461-1465
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/IEEM.2018.8607741	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsushi Nishi, Yushin Watanabe, Masaru Sakai	4. 巻 Vol. 15, No. 4
2. 論文標題 An Efficient Deadlock Prevention Policy for Noncyclic Scheduling of Multicluseter Tools	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automation Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 1677 - 1691
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASE.2017.2771751	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naiqi Wu, Tatsushi Nishi, Murat Uzam	4. 巻 Vol. 10, No. 6
2. 論文標題 Modeling, scheduling, and control in advanced production systems	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Advances in Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1687814018779621	査読の有無 無
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 Akito Kodama, Tatsushi Nishi	4. 巻 400-401
2. 論文標題 Petri Net Representation and Reachability Analysis of 0-1 Integer Linear Programming Problems	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Information Sciences	6. 最初と最後の頁 157-172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ins.2017.03.014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaru Sakai, Tatsushi Nishi	4. 巻 9(4)
2. 論文標題 Noncyclic Scheduling of Dual-Armed Cluster Tools for Minimization of Wafer Residency Time and Makespan	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Advance in Mechanical Engineering	6. 最初と最後の頁 1-12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1687814017693217	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 Masaru Sakai, Tatsushi Nishi	4. 巻 なし
2. 論文標題 Effects of Optimal Supervisor on Scheduling Performance of Multi-Cluster Tools	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of International Symposium on Scheduling 2017	6. 最初と最後の頁 117-120
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ryotaro Yamazaki, Tatsushi Nishi, Soh Sakurai	4. 巻 なし
2. 論文標題 A Decomposition Method with Discrete Abstraction for Simultaneous Traffic Signal Control and Route Selection Problem with First-Order Hybrid Petri Nets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 352-357
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/COASE.2017.8256128	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 浅沼倅平, 西竜志
2. 発表標題 入出力データを用いた多目的スケジューリング問題の目的関数選択
3. 学会等名 計測自動制御学会システム制御情報部門大会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 都甲英寿, 浅沼倅平, 西竜志
2. 発表標題 入出力データを用いた多目的スケジューリング問題の近似解法による重み係数推定
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kohei Asanuma and Tatsushi Nishi
2. 発表標題 Estimation of Weights for Multi-Objective Production Scheduling Problems -An Inverse Optimization Approach-
3. 学会等名 2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅沼倅平, 西竜志, 乾口雅弘
2. 発表標題 入出力データによる多目的スケジューリング問題の重み係数推定
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ziang Liu and Tatsushi Nishi
2. 発表標題 Particle Swarm Optimization Algorithm with Multiple Strategies for Continuous Optimization Problems
3. 学会等名 Scheduling Symposium 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浅沼 倅平, 西 竜志, 乾口 雅弘
2. 発表標題 入出力データによる多目的スケジューリング問題の重み係数推定
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuki Matsuoka, Tatsushi Nishi, Kevin Tinerney
2. 発表標題 Machine Learning Approach for Identification of Objective Function in Production Scheduling Problems
3. 学会等名 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 島村直樹, 西竜志
2. 発表標題 ペトリネットによる入出力データからのスケジューリング問題の同定
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsushi Nishi
2. 発表標題 Data Centric Approach for Supply Chain Optimization
3. 学会等名 Enterprose-Wide Optimization Seminar, March 6, 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsushi Nishi
2. 発表標題 Data Centric Approach for Supply Chain Optimization
3. 学会等名 Metaheuristic Seminar, November 8, 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 酒井 優, 西 竜志
2. 発表標題 スケジューリング性能の向上を目的とした最適スーパーバイザの検討
3. 学会等名 SICEシステム情報部門講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>ビーレフェルト大学での招待講演の概要(2018.11.8) http://www.wiwi.uni-bielefeld.de/lehrebereiche/bwl/dot/nachricht_nishi カーネギーメロン大学での招待講演のスライド(2019.3.6) http://egon.cheme.cmu.edu/ewo/docs/Tatsushi_Nishi_EWO.pdf</p>

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
研究協力者	ケビン ティアニ (Tierney Kevin)	ビーレフェルト大学・Faculty of Business Administration and Economics・Professor	
研究協力者	劉 子昂 (Liu Ziang) (30908166)	岡山大学・自然科学学域・助教 (15301)	

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
---------	---------