

令和元年6月17日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26350417

研究課題名(和文) 激変する社会に対応できるグローバル物流システムの開発

研究課題名(英文) Development of a global logistics system that can respond to a rapidly changing society

研究代表者

中田 和秀 (Nakata, Kazuhide)

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：00312984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：激変する社会環境の中で効率的な物流を行うためには、不確定な要因に対処する必要がある。このため、過去のデータから近い未来をできるだけ精度良く予測する手法について、機械学習の手法を援用して研究を行った。また、現実的な時間内で満足する解決策を導くため、安定的に近似解を求める実用的な最適化アルゴリズムを開発した。それらの研究成果を用いて、様々なタイプの現実問題に対し効率的なモデル化と最適化アルゴリズムの開発を行う事例研究を行った。これらの成果を15本の査読付き論文と9本の査読なし論文として発表した。また、38件の国内学会・国際学会での発表(うち招待講演6件)を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物流の最適化において、これまでは学術的側面からの研究が主流であり、実用性には程遠い研究が多かった。本研究では実務家との協働によって現実の複雑な状況を十分に考慮し、さらに最適化と機械学習の最新技術を融合させることで、輸送ルート決定など1週間から数ヶ月のスパンを想定するタクティカルレベル、並びに日々の輸送計画について検討するオペレーションレベルにおいて、現代の目まぐるしく変化する消費者の嗜好、予測の難しい突発的な大規模災害などに対して、効率的・合理的な物流計画が立案可能となっており実用性は高い。

研究成果の概要(英文)：In order to conduct efficient logistics in a rapidly changing social environment, it is necessary to deal with uncertain factors. For this reason, we have researched methods for predicting the near future to the past data as accurately as possible using machine learning methods. Also, in order to obtain a satisfactory solution in a realistic time, we have developed a practical optimization algorithm that calculates an approximate solution stably. Using these research results, we have worked on case studies and developed efficient modeling and optimization algorithms for various real problems. We published these results as 15 peer-reviewed articles and 9 non-peer-reviewed articles. We also made presentations at 38 domestic and international conferences, including 6 invited talks.

研究分野：オペレーションズ・リサーチ

キーワード：物流 オペレーションズ・リサーチ 最適化 機械学習 メタヒューリスティック

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現代社会では、ニーズの多様化やインターネットによる情報の氾濫など、社会が複雑化するともなって不確実性が高まっている。また、大規模な自然災害の発生や国際情勢の急速な変化などに対しても、リスクを想定し、迅速な対応が可能な体制を構築しておかなければ、企業間の競争に遅れをとることになる。すなわち、物流ネットワークを構築するには、状況の変化にフレキシブルに対応できる物流ネットワークを構築することが求められている。

2. 研究の目的

- (1) 激変する社会環境の中で効率的な物流を行うためには、不確定要素を含む要因に対処可能な方策を策定する必要がある。このため、過去のデータから近い未来をできるだけ精度良く予測する手法を確立する必要がある。また、需要変動など、ある程度予測可能な不確実性に対して、ロバスト最適化などを適用することにより、パラメータの変化に対して頑強な解を得る。
- (2) グローバル化に伴い、大企業・中小企業を問わず、世界規模でロジスティクスを行う企業も増えてきた。大規模な物流に対応できるシステムを構築する必要性は高まる一方である。また、より詳細に物流の制御を行いたいという要求も多い。その様な場合でも、現実的な時間内で満足する解決策を導くために、必要以上に最適解の計算に拘らず、近似解でよいので問題のサイズに対して、線形あるいはそれに近い計算時間で安定的に出来るだけ良い解を求める実用的な最適化アルゴリズムを開発する。
- (3) 多くの事例に応用できるよう、出来るだけ汎用的かつ実用的なシステム構築を行い、個々の現場に応じた様々な条件に対応できるようにする。現実の物流問題をモデル化する際は、細部を切り落とすため、数理モデルの厳密な最適解が一番実用的な解であるとは限らない。多様な解の候補をできるだけ多く抽出し、その中から状況に応じて人間が実行策を選択できるものを目指す。また、最適化結果が数字だけで中身がブラックボックスのまま終わらず、使用する人間の理解を深めるための手法を確立する。

3. 研究の方法

- (1) 実用的な意思決定モデルを構築するためには、広く事例を知る必要がある。そのため、多くの実務家へのインタビューや現地調査を行い、実用的な意思決定モデルを調査する。
- (2) 状況の変化やトラブルに頑強な物流計画をたてるため、近年急速に研究が進んでいる機械学習の手法を援用して、過去のデータから近い未来をできるだけ精度良く予測する手法を確立する。また、ロバスト最適化などの適用を試みる。
- (3) 世界規模での物流にも対応できるように、規模に影響を受けにくいアルゴリズムが必要である。今回の場合は、メタヒューリスティクスが有効であると考えている。よって、メタヒューリスティクスをベースとした問題のサイズに依存しにくく、かつ効率的な解法を構築する。
- (4) 上記の手法の効率的実装における課題を整理し解決を試みる。まず、予備実験を通じて問題点の洗い出しを行う。その後、現実問題を実際に解くアルゴリズムを開発・実装し、その有効性を数値実験によって検証する。また、数値実験の結果をフィードバックし、より良い最適化モデルに磨き上げる。

4. 研究成果

- (1) 状況の変化やトラブルに頑強な物流計画の立案するためには、将来の状況をできるだけ正確に予測できることが望ましい。一般に時系列を考慮することにより精度のよい予測が可能となる。しかし、近年よく用いられる再帰型ニューラルネットワークでは、時系列内で不変な属性情報も含めて適用すると、属性情報を重視しすぎた学習をしてしまい高精度な予測ができないという問題が生じる。そこで、この問題に対処できるように改良した部分再帰型ニューラルネットワークを提案した。また、予測精度の向上のため、ニューラルネットワークと画像認識分野で提案された転移学習を応用した手法を開発した。そして、偏りが生じにくい意思決定のため、新たに割当問題を提案し、その最適解を利用した意思決定システムを構築した。その後、数値実験によりその有効性を検証した。
- (2) 過去データからユーザとアイテム間の相性値の算出するモデルとして、潜在的意味解析の

モデルである Latent Dirichlet Allocation(LDA)をベースに、より安定した結果を出せるように改善した Ensemble LDA を提案した。LDA を用いることで、単純な判別モデルでは表現できない潜在的な関係を潜在トピックとして抽出可能になった。また、グラフ制約付き非負値テンソル因子分解による複属性推薦手法を提案した。そして、Guらがグラフ制約付き非負値行列分解に対して用いた更新式を拡張することで、各要素に関し大域的な最小解を得る更新式を導出し、反復を繰り返すと目的関数値が収束することを証明した。また、異常探知問題に対してデータの特性を考慮した判別モデルを提案し、さらに Boosted Random Forest に AdaC1 を適用することで精度の高い故障予知モデルを構築することに成功した。さらに、与えられたデータから特徴を抽出するため、トピックモデルの一種である PLSA や LDA、並びに再帰型ニューラルネットワークの一種である LSTM を適用し、さらに多くの工夫を加えることにより、有益な特徴の抽出に成功した。また、不完全な観測データに対して、Doubly Robust Prediction を用いたアップリフトモデリング法を提案し、その理論的解析と数値実験による性能の検証を行った。

- (3) 実務の現場でよく現れる非線形な制約のもとで最適化を行う枠組みとして、hybrid evolutionary-simplex search method を提案し、その有効性を検証した。また、クラスタリングを用いてスケジューリング問題に対する規模に影響を与えにくい実用的な解法を提案し、数値実験により検証を行った。また、非線形な最適化問題を効率良く解くために、メタヒューリスティックの一種である粒子群最適化を改良し収束性を高めた手法を開発し、数値実験によりその有効性を確かめた。それらの研究を踏まえ様々な実務状況を考慮した上での多様な数値実験の結果、実用上よく現れる現実的な制約条件や目的関数を含んだ大規模な最適化問題を現実的な時間で近似解を求めるための手法として、連続変数の場合は疑似焼きなまし法、離散変数の場合はタブーサーチが適しているという知見を得、それらが効率よく働くメカニズムを解明した。
- (4) 現実を反映させた待ち行列モデルの提案と、そのモデルを実装した待ち行列シミュレータの作成を行った。このシミュレータによって、現実の待ち行列の状況が再現できる。そして、ポアソン回帰によって様々な情報から時間ごとの到着数の予測を行った。これらを組み合わせることにより、待ち時間分布を高精度に予測することが可能となった。これらの予測を基に不確実性を考慮した最適な意思決定を行う方法の提案を行った。
- (5) 意思決定システムがブラックボックスにならず人間が理解できるためには、複雑な状況をシンプルに表現するための変数選択が重要である。そのため、VIF 基準による変数選択問題を混合整数 2 次計画問題として解く手法を開発した。ただし、複数の説明変数の間に強い線形従属性が存在すると、回帰式の推定が数値的に不安定になり、分析結果の信頼性が低下する。このような多重共線性を回避するため、多重共線性を回避する制約条件の下で回帰式の残差二乗和を最小化する変数選択問題を、最適化ソルバーで直接求解可能な最適化問題に帰着する手法の提案を行なった。そして、切除平面法による解法を提案した。さらに、条件数以外の指標に制約を与えた変数選択問題に対しても適用可能な厳密解法を提案した。
- (6) 様々な現実の状況を取り上げ、それを効率良く解くためのモデル化と最適化アルゴリズムの開発を行うという事例研究を行った。具体的には、巨大倉庫内のロジスティクスに対し、計算効率を向上させる近傍探索を実装した疑似焼きなまし法を適用することにより、巨大な物流問題の近似解を現実的な時間で導く手法を開発した。また、車両輸送問題に対し、特殊なタブーサーチと混合整数計画問題を組み合わせることにより、効率的に高精度な近似解を求める手法を開発した。また、キークレーン配置問題に対して、ラグランジュ緩和を適用して近似解を求める手法を提案した。また、汎用的な労働条件を考慮したスタッフスケジューリングに対するワークスケジューリング最適配分問題に対して問題の適切な分割法や効率的な解法の提案を行なった。そして、その性能の検証を行なった。さらに、これまでに得られた理論・実装両面での知見をベースにし、実用的なモデル化と近似アルゴリズムについて統一的な立場から整理し、それを論文にまとめた。また、実務の現場で現れるジョブショップスケジューリング問題に対し、特殊で精緻な契約条件を考慮した解法（ハイブリッドメタヒューリスティック）を開発した。また、超長期間を考慮した現実のポートフォリオ最適化問題に対し、動的計画法と疑似焼きなまし法を組み合わせた解法を提案し、シミュレーションの実行に準乱数を用いた準モンテカル口法を利用することにより、計算時間を抑える手法を開発した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 24 件)

Alyaa Abdelhalima, [Kazuhide Nakata](#), Mahmoud El-Alem, Amr Eltawil, A hybrid evolutionary-simplex search method to solve nonlinear constrained optimization problems, *Soft Computing*, in press. 査読あり.
DOI: 10.1007/s00500-019-03756-3

Yuta Saito, Hayato Sakata and [Kazuhide Nakata](#), Doubly Robust Prediction and Evaluation Methods Improve Uplift Modeling for Observational Data, *Proceedings of SIAM International Conference on Data Mining (SDM19)*, pp.468-476 (2019), 査読あり.
DOI: 10.1137/1.9781611975673.53

Ryuta Tamura, Ken Kobayashi, Yuichi Takano, Ryuhei Miyashiro, [Kazuhide Nakata](#), Tomomi Matsui, Mixed Integer Quadratic Optimization Formulations for Eliminating Multicollinearity Based on Variance Inflation Factor, *Journal of Global Optimization*, Vol.70, pp.431-446 (2019). 査読あり.
DOI: 10.1007/s10898-018-0713-3

福永峻, 田村悠, 根市和旗, 市瀬将也, 小楨瑠理子, 花村鴻太郎, 戸田開人, 片山翔太, 中田和秀, 部分再帰型ニューラルネットワークを用いたヘアサロンチェーンにおける顧客の離脱予測, *オペレーションズ・リサーチ* 64, pp.87-94 (2019). 査読あり.

高正妍, 田澤浩二, チョウイ, 大原靖之, 山野上勇人, 桑原惇, 片山翔太, 中田和秀, Ensemble LDAを用いた既存および新規顧客へのスタイリスト推薦, *オペレーションズ・リサーチ* 64, pp. 95-101 (2019). 査読あり.

Mahmoud Heshmat, [Kazuhide Nakata](#), Amr Eltawil, Modified Formulation for the Appointment Scheduling Problem of Outpatient Chemotherapy Departments, *Proceedings of the 4th International Conference on industrial Engineering and Applications (ICIEA 2017)*, pp. 192-196, (2019). 査読あり.
DOI: 10.1109/IEA.2017.7939205

Mahmoud Heshmat, [Kazuhide Nakata](#), Amr Eltawil, Solving the patient appointment scheduling problem in outpatient chemotherapy clinics using clustering and mathematical programming, *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 124, pp. 347-358 (2018). 査読あり.
DOI: 10.1016/j.cie.2018.07.033

田村悠, 吉住宗朔, 福永峻, 三宅聡一郎, 片山翔太, 中田和秀, ファッション EC サイトにおけるアンケートを用いたブランド推薦システム, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 63, pp. 91-98 (2018). 査読あり.

Alyaa Abdelhalima, [Kazuhide Nakata](#), Mahmoud El-Alem, Amr Eltawil, Guided Particle Swarm Optimization Method to Solve General Nonlinear Optimization Problems, *Engineering Optimization*, Vol. 50, pp. 568-583 (2017). 査読あり.
DOI: 10.1080/0305215X.2017.1340945

Ryuta Tamura, Ken Kobayashi, Yuichi Takano, Ryuhei Miyashiro, [Kazuhide Nakata](#), Tomomi Matsui, Best subset selection for eliminating multicollinearity, *Journal of the Operations Research Society of Japan*, Vol. 60, pp. 321-336 (2017). 査読あり.
DOI: 10.15807/jorsj.60.321

Koji Tazawa, Kazuki Neichi, Yasuyuki Ohara, Kazuki Chikuma, Shota Katayama, [Kazuhide Nakata](#), Apparel Item Recommendation using Graph Regularized Nonnegative Tensor Factorization, Department of Industrial Engineering and Economics Working Paper, 2017-5, Tokyo Institute of Technology (2017). 査読なし.

田澤浩二, 吉住宗朔, 平野豪一, 片山翔太, 中田和秀, 待ち行列シミュレータを用いた区役所における職員配置最適化, *オペレーションズ・リサーチ*, Vol. 62, pp. 75-82 (2017). 査読あり.

Makoto Yamashita, [Kazuhide Nakata](#), Fast implementation for semidefinite programs with positive matrix completion, *Optimization Methods and Software*, Vol.30, Issue.5, pp. 1030-1049, (2015). 査読あり.
DOI: 10.1080/10556788.2015.1014554

廣瀬貴也, 鈴木翔太, 佐藤悠介, 鈴木寛人, 中田和秀, 実務で現れるスタッフスケジューリングに対する近似解法, *京都大学数理解析研究所講義録* 1981, 新時代を担う最適化:モデル化手法と数値計算, pp. 98-116, (2015). 査読なし.

Mirai Tanaka, [Kazuhide Nakata](#), Successive projection method for well-conditioned matrix approximation problems, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol.21, Issue.4, pp. 418-422, (2014), 査読あり.
DOI: 10.1109/LSP.2014.230315

Mirai Tanaka and [Kazuhide Nakata](#), Positive definite matrix approximation with condition number constraint, *Optimization Letters*, Vol.8, pp. 939-947, (2014). 査読あり.
DOI: 10.1007/s11590-013-0632-7

Ahmed Karam, Amr Eltawil, T. Mizutani, [K. Nakata](#), N. A. Harraz, Quay crane allocation problem with the internal truck capacity constraint in container terminals, *京都大学数理解*

〔学会発表〕(計 38 件)

中田和秀: 実務の現場で現れる最適化, OR 学会研究部会「量子コンピュータと次世代計算機活用」, NTT データ豊洲センタービル, 2019.

Yuta Saito, Hayato Sakata and Kazuhide Nakata: Doubly Robust Prediction and Evaluation Methods Improve Uplift Modeling for Observational Data, SIAM International Conference on Data Mining (SDM19), Calgary (Canada), 2019.

福永峻, 桜田亮太, 平田雄太, 中田和秀: 大規模な物流倉庫のピッキング最適化に対する効率的な局所探索法の提案, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2019 年春季研究発表会, 千葉工業大学, 2019.

市瀬将也, 今村剛, 中田和秀: 田中善敏: 階層マルチラベルニューラルネットワークを用いた特許文書における FI の予測, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2019 年春季研究発表会, 千葉工業大学, 2019.

M. Abdelgalil, Z. Yahia, T. Mizutani, K. Nakata, Amr B. Ertawil: A Variable Neighborhood Search Algorithm with New High-Weight-Constraints-Focused Structures for The Nurse Rostering Problem, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018 年秋季研究発表会, 名古屋市立大学, 2018 .

チョウ イ, 中田和秀, 二宮祥一, 張志鋒: 準モンテカルロ法を用いた平均回帰金利に基づく多期間ポートフォリオ最適化, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2018 年秋季研究発表会, 名古屋市立大学, 2018.

中田和秀: データ解析コンペティションへの挑戦, OR 学会関西支部シンポジウム「表彰と OR」, 関西大学, 2017 .

三宅聡一郎, 平野豪一, 中田和秀: 印刷工場における実務を考慮した生産スケジューリング, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2017 年秋季研究発表会, 関西大学千里山キャンパス, 2017.

M. Heshmat, K. Nakata, A. Ertawil: Modified Formulation for the Appointment Scheduling Problem of Outpatient Chemotherapy Departments, the 4th International Conference on industrial Engineering and Applications(ICIEA 2017), Nagoya Institute of Technology, Nagoya (Japan), 2017.

田澤浩二, 森秀樹, Cross Jeffrey Scott, 中田和秀: 時系列ニューラルネットワークを用いた MOOC 受講者の離脱要因分析, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2017 年春季研究発表会, 沖縄県市町村自治会館, 2017.

田澤浩二, 吉住宗朔, 平野豪一, 片山翔太, 中田和秀: 板橋区役所における待ち時間予測モデルの構築, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年秋季研究発表会, 山形大学, 2016.

Ryuta Tamura, Ken Kobayashi, Yuichi Takano, Ryuhei Miyashiro, Kazuhide Nakata, Tomomi Matsui: A Mixed Integer Semidefinite Programming Approach for Variable Selection Avoiding Multicollinearity, The fifth International Conference on Continuous Optimization, the National Graduate Institute for Policy Studies (Japan), 2016.

谷川奈穂, 片山翔太, 大山卓也, 中田和秀: 複写機の稼働情報を用いた部材の交換予測, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年春季研究発表会, 慶應義塾大学, 2016.

廣瀬貴也, 鈴木翔太, 佐藤悠介, 鈴木寛人, 中田和秀: 実務で現れるスタッフスケジューリング問題に対する近似解法, 京都大学数理解析研究所研究集会 新時代を担う最適化: モデル化手法と数値計算, 京都大学, 2015.

Kazuhide Nakata: Interior-point methods for symmetric cone programming, Potential Collaboration Meeting between KAIST and Tokyo Institute of Technology (Japan), 2015.

中田和秀, 佐藤悠介, 鈴木翔太: スタッフスケジューリングに対する近似解法, 教育和研究的前沿探索, 清華大学(中国), 2014.

小林健, 高野祐一, 宮代隆平, 中田和秀: 多重共線性を考慮した回帰式の変数選択 混合整数半正定値計画法を用いた解法, 京都大学数理解析研究所研究集会 最適化アルゴリズムの進展: 理論・応用・実装, 京都大学, 2014.

Ahmed Karam, Amr Ertawil, Nermine Harraz, Tomohiko Mizutani, Kazuhide Nakata: Quay crane allocation problem with the internal truck capacity constraint in container terminal, 京都大学数理解析研究所研究集会 最適化アルゴリズムの進展: 理論・応用・実装, 京都大学, 2014.

小林健, 高野祐一, 宮代隆平, 中田和秀: 多重共線性を考慮した回帰式の変数選択 混合整数半正定値計画法を用いた解法, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2014 年秋季研究発表会, 北海道科学大学, 2014.

Kazuhide Nakata and Makoto Yamashita: Improved Implementation of Positive Matrix Completion Interior-Point Method for Semidefinite Programs, SIAM Conference on Optimization, San Diego(USA), 2014.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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、研究者個人に帰属されます。