

令和元年6月5日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00301

研究課題名(和文)多数の参加者の選好を考慮する多目的最適化と協調問題解決および制度設計手法の融合

研究課題名(英文) Integrating multi-objective optimization, cooperative problem solving and system design for preferences of multiple participants

研究代表者

松井 俊浩 (Matsui, Toshihiro)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60437093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：コラボレーション支援，交通や物流の制御などの実際的な資源割り当てに必要な，複数の参加者の選好を調整するための協調問題解決，制度設計，行動規則の学習を融合した問題とその解法を検討した。

(1)複数の参加者の利益の調整の場として多目的最適化問題の対話型解法のアプローチを適用する枠組，(2)未知の環境における最適経路や協調行動規則の学習において公平性を考慮するための最悪コストの改善やコストの標準化の規則の導入，(3)多数の参加者の不平等の均衡のための緩和型の解法や確率的局所探索法などを提案し，その効果を勤務時間スケジューリングや経路最適化などの例題における参加者の利益について実験的に評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義：多目的最適化，協調問題解決，制度設計，行動規則の学習を融合した，新たな問題と解法の模索，参加者の公平性と主体性を重視する最適化手法の検討に本研究の特色があり，このような最適化の枠組と，実際的かつ大規模な系に適用する方法の一端を明らかとしたことに，学術的な意義がある。

社会的意義：近年のサービスにおける多数の参加者からなるコラボレーション支援やネットワーク上の電力，交通，施設等の資源の割り当てにおいては，個々の参加者の利益やコストの水準を維持する利害調整を考慮しつつ意思決定を行うための協調的な最適化手法が求められており，その基礎検討としての社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We addressed the integration of cooperative problem solving, system design and reinforcement learning methods for practical problems including collaboration assistance or routing problems considering the preference among members or residents, where the unfairness among participants should be improved.

We investigated (1) a framework based on interactive multi-objective optimization methods for multiple parties, (2) learning methods to obtain optimal routes or policies considering fairness among members related to unknown environments, and (3) relaxation and stochastic local search algorithms to improve the fairness for large-scale problems. The proposed methods are experimentally evaluated with several example problems including a nurse scheduling problem with individual preferences and a route optimization with environmental costs for partial areas.

研究分野：マルチエージェントシステム

キーワード：マルチエージェントシステム 協調問題解決 多目的最適化 公平性 学習

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

情報システムの高度化を反映し、ソーシャルネットワーク上のコラボレーション支援、電力スマートグリッド、交通流制御、大規模事故発生時の医療施設への搬送計画などを対象とする高度な意思決定・計画手法が研究されている。

このような系では本質的に、サービス、計算・記憶・通信、電力、設備などの「資源」を「参加者」に適切に配分することが必要とされる。資源が有限である場合は、社会全体だけではなく、個々の「参加者」が一定の水準の利益を得ることが不可欠である。

近年のエンドユーザ向けの情報処理・通信環境の向上により、参加者の主体性や要望を考慮することの重要性が増し、参加者間の利害の調整を考慮しつつ意思決定を行う、粒度の細かな手法がより発展すると考えられる。

従来のも最適化では系全体の指標に基づく単一の目的を扱うことが一般的である。複数の目的を扱う多目的最適化が提案されているが、多数の参加者間の調整という観点からの議論は比較的少ない。

また、人工知能分野では複数の参加者による協調問題解決や、合意形成を促進する制度設計、未知の環境における行動規則の学習などが検討されているが、それらは独自に検討されているため、上記の多目的最適化を含めた総合的な視点からの検討には未開拓の部分があると考えられる。

本研究では、これらに関連する従来研究分野の融合に注目した。

(1) 多目的最適化: 複数の目的を同時に最適化する多目的最適化は比較的長い歴史を持ち、高度な知見と解法が得られている。その一方で、装置や設備の設計開発における複数のパラメータの決定など、系全体に共通な目的が複数ある場合の検討が代表的である。近年の社会の動向を考慮した、多数の参加者間の調整という観点の議論は比較的少ない。

(2) 協調問題解決: 複数の参加者間の相互作用により問題を解決する手法を検討する協調問題解決は、人工知能分野のマルチエージェントシステムの研究である。研究代表者はこの研究に従事している。近年、参加者間の公平性を考慮する、多目的な協調問題解決の重要性が指摘されている。

(3) 制度設計: 参加者の安定的な意思決定を誘引するモデルを、予め解決が容易な最適化問題として構築する制度設計は近年、人工知能分野のマルチエージェントシステムの研究として発展している。その一方で、事前の静的な設計が主体であり、その場での最適化を伴う問題解決手法との相補的な活用の模索が今後の課題の一つである。

(4) 公平性を考慮する行動規則の学習: 未知の状況における行動規則の学習は基本的な最適化技術として研究されている。その一方で、複数の参加者の公平性を直接的に考慮する手法には検討の余地があると考えられる。

これらの互いに関連する内容について、今後はより相補的な関係を活用することが望ましい状況にあると考えられる。

### 2. 研究の目的

上記の、多目的最適化、協調問題解決、制度設計、学習の融合と相補的な活用を模索することを本研究の目的とした。申請者が従事する協調問題解決からの発展を主体とし検討を進めた。次の事項を当初の課題として設定した。

(1) 協調問題解決と多目的最適化を融合した複数の参加者が関係する系を表現する問題とその解法: 両者の融合により、協調問題解決からのアプローチを発展し、スケーラビリティを向上する。また、従来の多目的最適化問題の観点から、本研究で扱う問題の特徴を明らかにする。

(2) 協調問題解決と制度設計手法を相補的に活用する手法とその有効性: 解決が容易な最適化問題として構築される制度設計を、補助的な発見的な手法として捉え、協調問題解決手法の効率を向上する。また、静的に構築される性質の制度設計の周辺に、協調問題解決手法を配置することにより、状況に応じた柔軟性を得る方法を明らかにする。

(3) 実際的な問題への可能性: コラボレーション支援などの問題への適用を検討する。このために適用可能な近似解法の可能性などを明らかにする。

(4) 個々の参加者の公平性を考慮する多目的最適化手法の指標の行動規則の学習への適用: 従来の強化学習などの最適化指標に公平性などの指標を導入する。これにより、未知の環境における行動規則を獲得する解法において参加者の利益の平準化を目指す。

### 3. 研究の方法

研究の目的に挙げた課題について検討し、各問題の分析と形式的な定義、および解法の開発からなる一連の検討を進めた。提案手法の検証と評価は、計算機シミュレーション実験によって行った。

(1) 協調問題解決と多目的最適化を融合した、複数の参加者が関係する系を表現する問題とその解法について、参加者の主体性と利益の公平性を重視する指標に基づく解法を、一般的な多目的最適化の枠組で捉えなおし、その解法について検討した。全ての参加者に分散して配置さ

れた意思決定のための解法を、通信を介して駆動する、分散協調処理の枠組には高い自律性がある一方で、多数の参加者に対応するスケーラビリティのためには、完全な分散処理のみではなく、適切な情報の集約が必要となる場合がある。そこで、調停者に部分的に抽象化した問題を集約し、多目的最適化分野の従来型の解法の応用を試みた。また、協調問題解決で重視される参加者の主体性の観点からは、情報の集約によって全権を調停者に委譲することには望ましくない面がある。そこで、調整の過程を参加者が把握し、追加的な選好を与える枠組を検討した。すなわち解法と利用者の対話を、多数の参加者との対話に読み替えた、対話型解法の枠組みについて検討した。

(2) 多数の参加者が存在する系におけるスケーラビリティのための非集中型非厳密解法について検討した。最適解を得る完全な解法は大規模かつ複雑な問題への適用が困難な場合がある。そこで、各参加者が直接的に関連する範囲の相手や、探索空間中の限られた近傍のみを考慮して情報を伝搬しつつ問題を解く解法を適用した。ここでは、緩和法に基づく解法の検討および、確率的山登り法を改良した手法の適用を試みた。

(3) 協調問題解決と制度設計手法を相補的に活用する手法とその有効性の検討においては、異なるアプローチとして扱われる協調問題解決と制度設計手法の接点と融合の可能性を探ることを試み基礎的な検討を行った。ここでは、計算資源の制限等により協調的な問題解決に参加できない参加者の意思決定の戦略が異なる場合を考慮する解法の枠組みについて基礎的な検討を行った。

(4) 実際的な問題への適用の可能性の検討においては、経路最適化における近隣住民や施設への負担の平準化や、勤務計画におけるスタッフの不満の均衡化を例題として、各種の最適化指標及び解法の適用を検討した。指標として、最大コストおよび、公平性を考慮する社会厚生を適用し、解法として、動的計画法にもとづく経路最適化手法の拡張および、局所探索に基づく解法を適用した。

(5) 個々の参加者の公平性を考慮する多目的最適化手法の指標の行動規則の学習への適用として、単一または複数エージェントにおける強化学習における最適化指標の置換と、解法への影響の分析、および指標に応じた探査、学習測の適用について検討した。上述の経路最適化の指標を経路コストの平準化を考慮するよう拡張した問題のために、探査と学習に基づく解法を適用する基礎的な枠組みを模索した。また、複数エージェントによる対象物の追跡などの協調行動の学習においても、参加者の行動コストの平準化を指標とする手法とその影響について実験的に分析した。

#### 4. 研究成果

以下の主な成果が挙げられる。

##### (1) 協調問題解決と多目的最適化を融合した問題とその解法

協調問題解決と多目的最適化を融合した問題とその解法の検討を進めた。多目的最適化問題の解法のアプローチである対話型解法を複数の参加者が交渉を行なう場として捉え、その枠組について検討した。従来の対話型解法は、ユーザからのパラメータ入力にもとづきソルバが解を返す手順を反復することにより、望ましい解を得る。このユーザを複数の参加者の集合、ソルバを調停者とする際の課題を検討した。特に、多目的最適化の指標として公平性を考慮する指標を導入する方法とその影響の基礎的な評価を行なった。

多目的最適化問題の対話型解法のアプローチを、複数の参加者の利益の調整の場として適用する枠組の検討では、公平性を改善することを意図する指標である **leximin** に加重した指標を目的とする最適化問題を導入し、パレート最適性と加重による解品質への影響を実験的に評価した。これにより導入した指標が選好の調整における公平性の改善に寄与する一方で、加重の調整の方法についての課題が明らかとなった。(雑誌論文⑬⑭)

##### (2) 公平性と学習との融合

また、動的環境における資源割り当てのための、マルチエージェント強化学習に含まれる協調的な行動選択で、参加者の公平性を考慮する方法について検討した。従来の目的が系全体の利益を最大化することに対して、個々の参加者の不平等さの改善を期待し、行動選択の指標を変更することの影響と効果について調査した。特に分散センサ網における観測資源の動的な割り当て問題における未観測領域の削減を例題とした。ここでは、行動選択のための最適化の指標を、最悪コストとコストの平準化を考慮するものに、置き換えた解法について実験的に評価した。幾つかの簡単な問題設定においては、最貧者の利益を改善する効果が得られた一方で、より複雑な設定に対応するための、学習側における経験の正規化などの課題が明らかとなった。

また、多目的最適化における公平性を考慮するスカラ化の指標を経路最適化問題に導入する手法を検討した。従来の経路最適化では、最短経路を求めることが基本的であるが、その一方で、実際的な場面では、配送等の車両が通過する近隣住民の不満や、経路上の設備の余命の程度など、コストやリスクが極端に高い特定の個所を避けつつ、全体のコストを平準化することが望まれる場合が考えられる。そこで、部分経路コストの最悪値と全体のコストの不平等さを改善する指標であり、かつ動的計画法に分解可能な指標を従来型の経路最適化手法に導入し、このような要件を満足する経路最適化手法を提案した。さらに、このような手法を探査と学習を伴

オンライン型探索に導入する際の問題点を指摘し、その緩和策となる発見的手法について検討した。この検討では、最悪コストと不平等性を改善する指標である *leximin/leximax* を可変長の目的ベクトルに拡張し、動的計画法に基づく A\* アルゴリズムに適用することにより、この指標のもとで合理的な経路を得ることを示した。また、動的計画法にもとづく、探索と学習を伴う未知の環境下での試行錯誤的な最適化への展開として、オンライン型探索への適用を模索し、探索における単調性が問題となることを示し、これに対する緩和策としての発見的探索を伴うエピソード型学習手法を提案した。これらは、従来の経路最適化手法の指標を置換する拡張の方向性ととともに、強化学習等への展開における課題を模索する上での基礎的な成果と考えられる。

さらに、複数のエージェントの協調行動を試行錯誤的に獲得する集中型の強化学習において、エージェントの最悪コストと公平性を考慮する指標の導入の可能性について検討した。複数のハンターが逃避的に移動する対象を追い込む追跡問題を題材とし、協調行動の学習過程を変更した貪欲的な手法を適用した。問題が決定論的である場合や雑音が比較的小さい場合は、公平性が比較的改善する結果が示された。その一方で、貪欲的な手法が局所解の影響を受ける場合や雑音が大きい問題では効果が小さいなど今後の検討課題も示唆された。(雑誌論文①⑩⑫⑮)

### (3) 制度設計と制約最適化の融合の模索

制度設計と分散制約最適化手法の融合の基礎検討として、複数の参加者の利益を考慮する非対称な制約最適化問題において、一部の参加者が系の最適化に協力せず、発見的な貪欲戦略に基づく場合の影響を実験的に分析した。このような非厳密解法の視点には系の規模や問題の複雑さの程度が増大した場合の必要性が考えられる。この検討では、基本的な貪欲戦略による非協力的行動の利害への影響の程度、非協力的な参加者の発見的な選択について検討した。非参加者の利己的な戦略の程度による結果への影響が見られた一方で、より合理的な解法と戦略についての今後の検討課題が示唆された。(雑誌論文⑧)

### (4) 勤務時間スケジューリングへの適用の模索

勤務時間割スケジューリング問題に、参加者の公平性を考慮する指標に基づく最適化手法を適用した。さらに大規模問題のために、解法に確率的山登り法を適用する際の影響を実験的に分析した。これにより、指標の種類に固有の探索空間の形状が解品質に影響することや、非厳密解法を用いる場合でも公平性などの性質の一部がある程度は合理的に反映されることが示唆された。この検討では、確率的山登り法にもとづく非厳密解法が局所解の影響を受ける一方で、指標によっては合理的な解を得ることが実験的に示唆されたことに意義があると考えられる。(雑誌論文⑦)

### (5) 緩和法に基づく非集中型解法の適用

エージェントの選好を考慮する多目的非対称分散制約最適化問題の非集中型解法として緩和法を適用する手法について検討した。エージェントの最大コストを最小化する問題を対象とした。元の問題に罰金法を適用する緩和問題をエージェントに分解し、エージェント間の情報交換により準最適化を行う手法を適用した。緩和法を適用した間接的な問題に基づく解法を用いる場合においても、従来の合計コストの最小化よりも、最大コストを抑制できる例が示された。その一方で非凸な問題における局所解への収束の影響などの課題について今後の検討課題も示唆された。(雑誌論文②④⑤)

以上の成果は、個々の参加者の公平性を調整する多目的最適化と協調問題解決、制度設計、学習を融合する枠組みの基礎となり、今後の社会において要求されるより実際の最適化問題の解決に発展することが期待される。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

① [Toshihiro Matsui](#), A Study of Joint Policies Considering Bottlenecks and Fairness, 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 査読有, vol. 1, 2019, pp. 80-90

DOI: 10.5220/0007577800800090

② [Toshihiro Matsui](#) and Hiroshi Matsuo, A Study of Relaxation Approaches for Asymmetric Constraint Optimization Problems, 21st International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems, 査読有, 2018, pp. 535-543

DOI: 10.1007/978-3-030-03098-8\_39

③ [松井俊浩](#), 松尾啓志, 閉路を持つ因子グラフのための分散制約最適化手法の一般化, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, vol. J101-D no. 9, 2018, pp. 1305-1315

DOI:10.14923/transinfj.2017SAP0021

④ [松井俊浩](#), 多目的非対称分散制約最適化のための緩和法の一検討, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2018 予稿集, 査読無, 2018

⑤ [松井俊浩](#), 非対称な制約最適化問題におけるボトルネック最適化手法の一検討, 2018 年度人工知能学会全国大会(第 32 回)論文集, 査読無, 3J2-01, 2018

⑥ [Toshihiro Matsui](#), Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo and Hiroshi

Matsuo, Leximin Multiple Objective DCOPs on Factor Graphs for Preferences of Agents, *Fundamenta Informaticae*, 査読有, vol. 158, issue 1-3, 2018, pp. 63-91

DOI: 10.3233/FI-2018-1642

⑦ 川瀬飛来, 松井俊浩, 公平性を考慮する重み付き制約充足問題に基づくナーススケジューリング, 2018年電子情報通信学会総合大会情報・システム講演論文集, 査読無, vol. 1, D-8-7, 2018

⑧ Toshihiro Matsui, An Investigation of Non-cooperative Agents on Asymmetric Optimization Problems, IAENG IMECS ICAIA 2018, 査読有, 2018

⑨ Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo and Hiroshi Matsuo, Leximin Asymmetric Multiple Objective Distributed Constraint Optimization Problem, *Computational Intelligence*, 査読有, vol. 34, issue 1, 2018, pp. 49-84

DOI: 10.1111/coin.12106

⑩ Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Hiroshi Matsuo, Study of Route Optimization Considering Bottlenecks and Fairness Among Partial Paths", 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 査読有, vol. 1, 2018, pp. 37-47

DOI: 10.5220/0006589000370047

⑪ 松井俊浩, 松尾啓志, ボトルネックと公平性を指標とする経路最適化の検討, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2017 予稿集, 査読無, 2017

⑫ 松井俊浩, 松尾啓志, 区間コストの公平性を考慮する経路最適化の検討, 2017年度人工知能学会全国大会(第31回)論文集, 査読無, 2017

⑬ 松井俊浩, 複数エージェントの多目的最適化のための対話型解法の基礎検討, 2017年電子情報通信学会総合大会 情報・システム講演論文集, 査読無, vo. 1, D-8-1, 2017

⑭ Toshihiro Matsui, A Study on Applying Interactive Multi-objective Optimization to Multiagent Systems, IAENG IMECS ICAIA 2017, 査読有, 2017

⑮ Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, A Study on Cooperative Action Selection Considering Unfairness in Decentralized Multiagent Reinforcement Learning, 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 査読有, vol. 1, 2017, pp. 88-95

DOI: 10.5220/0006203800880095

[学会発表] (計 12 件)

① Toshihiro Matsui, A Study of Joint Policies Considering Bottlenecks and Fairness, 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 2019

② Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, A Study of Relaxation Approaches for Asymmetric Constraint Optimization Problems, 21st International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems, 2018

③ 松井俊浩, 多目的非対称分散制約最適化のための緩和法の一検討, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2018, 2018

④ 松井俊浩, 非対称な制約最適化問題におけるボトルネック最適化手法の一検討, 2018年度人工知能学会全国大会(第32回), 2018

⑤ 川瀬飛来, 松井俊浩, 公平性を考慮する重み付き制約充足問題に基づくナーススケジューリング, 2018年電子情報通信学会総合大会, 2018

⑥ Toshihiro Matsui, An Investigation of Non-cooperative Agents on Asymmetric Optimization Problems, IAENG IMECS ICAIA 2018, 2018

⑦ Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Hiroshi Matsuo, Study of Route Optimization Considering Bottlenecks and Fairness Among Partial Paths", 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 2018

⑧ 松井俊浩, 松尾啓志, ボトルネックと公平性を指標とする経路最適化の検討, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2017, 2017

⑨ 松井俊浩, 松尾啓志, 区間コストの公平性を考慮する経路最適化の検討, 2017年度人工知能学会全国大会(第31回) 論文集, 2017

⑩ 松井俊浩, 複数エージェントの多目的最適化のための対話型解法の基礎検討, 2017年電子情報通信学会総合大会, 2017

⑪ Toshihiro Matsui, A Study on Applying Interactive Multi-objective Optimization to Multiagent Systems, IAENG IMECS ICAIA 2017, 2017

⑫ Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, A Study on Cooperative Action Selection Considering Unfairness in Decentralized Multiagent Reinforcement Learning, 9th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, 2017

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

## 6. 研究組織

（代表者による単独の研究組織）

※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。