

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12117

研究課題名(和文) 利用者間合意形成における情報提供と効用をトレードオフする非集中型最適化基盤

研究課題名(英文) Decentralized Optimization Infrastructure for Trade-offs Between Shared Information and Utility in Decision Making of Users

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) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：利用者がプライバシー情報を提示しつつ、互いの利害を調整するサービスにおいて、漏洩情報と得られる効用を調整するために、利用者を代理する「エージェント」間の多目的最適化問題にプライバシー情報のコストの概念を融合し、情報公開と合意による利益とのバランスを最適化する汎用的な交渉手法を提案した。

エージェントの状態と関係を記述する変数値と非対称な関数の効用値を段階的に公開するために、調停者と利用者エージェントによる確率的局所探索と、非集中型厳密解法を適用した。情報公開の基本的な戦略について実験的に分析し、他のエージェントの状況と公平性を考慮する交渉により、系全体のトレードオフを平準化する効果を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工知能分野のマルチエージェントシステム上の問題解決のための非集中型最適化手法を発展し、多数の参加者間の利害調整のための多目的最適化にプライバシー情報提供の評価を統合した最適化問題の定式化と、その解法に基づく、汎用的な交渉の枠組みの基礎検討を行い一定の知見を明らかにしたことに学術的意義がある。クラウドコンピューティング環境やIoT機器を活用し、複数の利用者に伴随する情報や要望もとに、利用者の意思決定や共同作業のマッチングなどを支援するサービスにおいて、利用者側が情報の公開の程度を指定して合意に至る過程で漏洩する情報と合意による利益を調整する、より粒度の細かいサービスの基礎として社会的意義がある。

研究成果の概要(英文)：We developed generic negotiation methods that optimize the balance between private information disclosure and the benefits of agreement among users in the services where negotiator "agents" acting on behalf of users present some part of their private information to achieve an agreement among users based on the published information. The negotiation is represented with multi-objective optimization problems among user agents and the cost of private information to be partially disclosed is introduced.

To gradually disclose the variable values and the utility values of asymmetric functions that describe the states and relationship of the agents, we applied a probabilistic local search by a mediator and user agents, and the negotiation with a decentralized exact solution method. Basic strategies of information disclosure were experimentally analyzed, and the effect of leveling the trade-off of the entire system was shown by negotiations considering the fairness of agents' situations.

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 プライバシ 合意形成 非集中型最適化 多目的

## 1. 研究開始当初の背景

(1) クラウドコンピューティング環境や IoT 機器を活用しつつ中央集権的に情報を収集・管理するサービスのモデルが発展している。これにより、複数の利用者に付随する情報や要望を収集し、利用者の意思決定や共同作業のマッチングなどを支援する高度なサービスの提供が期待される。これに対して情報の一極集中の懸念により、非集型処理モデルも見直されている。複数組織が運営するサーバ群からなる連合型サービスや、IoT 機器などと接続する利用者側の端末計算機に利用者固有の処理を委譲するエッジ/フォグコンピューティングなどの分散処理モデルがその例である。利用者情報をクラウド上に分散配置し、提供の権限を利用者が緻密に制御するサービスも現れつつある。これは、情報の非集中とプライバシー保護を重視する非集中型の情報処理基盤を求めるものである。このためには、従来の複数の非集中処理技術を統合して、利用者の情報漏えいを制御し、かつ複数端末計算機による協調的計算も行なう新たな非集中処理技術が必要である。

(2) その一方で、情報の漏洩を抑制すれば、提供した場合よりもサービス品質が低下することが自然であり、適切な程度の利用者の信頼に基づく情報提供を調整する方法が必要である。

人工知能分野のマルチエージェントシステム上の最適化技術の研究では、複数の人やその代理の装置・ソフトウェアであるエージェントが通信を伴って相互作用する系を扱い、それらの望ましい状態を非集中処理的な手法により決定する。各エージェントの状態や相互関係を変数や目的関数により最適化問題として記述し、エージェントが情報を交換しつつ最適解を得るアルゴリズムを検討する。この非集中型最適化技術を実際面へと発展し、情報公開の程度をも最適化の対象とする方法の開拓は今後の重要な課題である。

(3) プライバシーを秘匿した合意形成に関する研究には、段階的に手の内を明かす、自動交渉エージェントなどがあり、国内の研究者の貢献も大きい。特定の交渉手順に特化した問題設定と解法であり、より汎用的な枠組での問題の定式化と解法に検討の余地がある。また、データを暗号化したまま演算を行なう秘密計算は、情報を完全に秘匿する手法として近年注目されているが、参加者の共有情報への関与を遮断するものでもあり、情報の公開と共有から参加者が得る知識による利益を考慮する手法との相補的な関係の検討の余地もある。関連研究において未着手の、多数の参加者間において、情報提供によるプライバシー損失と、その見返りにより得られる合意やサービスからの利益を、統合して同時に調整する汎用的な最適化手法を開拓し、基礎的な情報処理基盤を開発する新たな取り組みが必要である。

## 2. 研究の目的

(1) 多数の利用者のプライバシー情報を活用しつつ、利用者間の利害調整を行うサービスを想定し、利用者が他者を信頼し提供するプライバシー情報の程度と、それにより得られる効用(利益)を調整するための情報処理基盤を構築することを目的とする。このために、利用者間の意思決定や共同作業の調整を、非集中型の多目的最適化問題として解決する手法に、プライバシーのコストの概念を融合して発展させ、プライバシー情報の公開と見返りとして得られる可能性がある利益とのトレードオフを最適化するための指標、その指標にもとづき、情報公開の程度を調整する最適化手法、利用者がトレードオフを対話的に把握しつつ合意を達成する。これらの処理を利用者の

代理する複数のエージェントから成る系におけるエージェント間の交渉として解決する手法の開発と評価を目的とする。

(2) このような問題解決において最適化すべき指標を定式化する。利用者の利益についての汎用的な記述性を持つ多目的最適化問題に、解法の実行中に生じるプライバシー漏洩コストの概念と評価指標を導入した問題を定義することが基本的な目的である。プライバシー漏洩コストを新たに最適化すべき目的の一つとして、他の目的とのトレードオフ調整と、利用者間の利害調整を統合した多目的最適化問題として表現する。

(3) この問題の解法として、利用者を代理する複数エージェントシステム上で、プライバシー漏洩コストおよび、本来の目的やコストを非集中的に最適化する交渉ための手法を開発することが目的である。マルチエージェントシステムにおける基本的な問題解決手法である分散制約最適化手法を基礎として、段階的に情報を公開しつつ妥協点を探る戦略を活用し情報公開による影響を事前に見積もりつつ最適化する手法について検討する。多数の参加者のエージェントそれぞれが自身のプライバシー情報提供の程度や他の利益・コストの要求を指定し、結果の提示から、プライバシーと他の利益・コストのトレードオフの関係を把握し、適切な妥協点を学ぶ対話的な要素を持つ解法がより発展的な目的である。

### 3. 研究の方法

(1) 多数の利用者の利害調整を支援するサービスのために、情報公開の程度と利用者の利益・コストとのトレードオフを調整するための汎用的な多目的最適化問題と、その非集中型解法について検討する。また、利用者と解法との間のフィードバックのための対話的な交渉の枠組について検討し、開発した手法の有用性を実験的に分析する。

(2) 先ず、マルチエージェントシステム上の非集中型最適化手法である多目的分散制約最適化問題を発展させ、参加者間のプライバシー情報公開と、従来の目的関数の調整を統合した、新たな多目的最適化問題とその最適化の指標を定式化する。プライバシー情報の公開の程度と従来の目的関数の解品質のトレードオフを探り最適化する非集中型解法を開発する。参加者間の要求の公平性の考慮も加えた統合的な最適化手法についても検討する。

(3) また、解法を発展させ、情報提供に先立って情報の一部を参加者のエージェントが参照し、情報提供の戦略に活用する手法を開発する。これにより、不可逆な情報公開に対して段階的に手の内を明かす戦略と相補的な合意形成手法の可能性を探る。このような対話的な交渉により参加者を代理するエージェントが合意形成する系において、エージェントの基礎的な戦略の影響をシミュレーションにより実験的に分析する。さらに、エージェント間の交渉の処理の部品を構成する非集中型最適化手法自体についても、スケーラビリティの向上のために、サンプリングに基づく手法などを拡張し、エージェント間の公平性を考慮する多目的最適化問題に適用する。

### 4. 研究成果

(1) 各エージェントの意思決定と、それらの関係を変数と非対称な関数により記述する離散最適化問題を拡張し、エージェントの変数の値域の情報公開がエージェントのプライバシー情報の

漏洩コストを伴う問題を定義した。この問題の解法として、各エージェントが段階的に 変数値とそれに関する非対称な関数の効用値を公開する手法について検討し、調停者と各エージェントからなる、反復的な確率的局所探索を伴う交渉により、合意を形成する過程を構成し、各エージェントの情報公開の基本的な戦略について実験的に分析した。各エージェントが、他のエージェントの情報公開の状況を考慮する戦略により、情報公開の程度の比率を系全体で平準化する効果があることを示した。

(2) また、解法として非集中型の厳密解法を適用し、交渉の過程でエージェント間の公平性を考慮する指標によりプライバシ情報の漏洩コストの平準化を目指す場合について分析し、効果が得られる場合と課題を示した。各エージェントが段階的に 変数値とそれに関する非対称な関数の効用値を公開する戦略により合意を形成する手法を拡張し、交渉の前処理により効用の調整と近似をする効果と影響を調査した。

(3) さらに、エージェント間の公平性を考慮しコストや利益を平準化する、非集中型の最適化問題の解法のスケーラビリティ向上のために、基礎的な分散型確率的山登り法の適用を検討した。解法においてエージェント間の協調に用いる評価指標の効果と影響を実験的に分析し、問題のクラスにより効果が得られる指標があることを示した。また、非集中型の進化的計算に基づく解法を用いて、各エージェントのコストの公平性と最悪の値の改善を最適化する手法について検討し、効果と影響を実験的に分析した。この基礎とした従来解法における、各エージェントの情報過剰な共有による漏えいを抑制するために、エージェントが持つ情報を系全体に分散して保管し、適切に情報交換しつ問題解決する手法についても検討した。

これらの検討の成果がプライバシ情報の公開とそれに基づく利用者間の合意の利益を考慮する交渉の枠組みにおける合意形成の洗練と系の規模拡大の発展につながることを期待される。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Toshihiro Matsui	4. 巻 1
2. 論文標題 A Study on Negotiation for Revealed Information with Decentralized Asymmetric Multi-objective Constraint Optimization	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 149-159
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5220/0010349601490159	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 Toshihiro Matsui	4. 巻 1
2. 論文標題 Investigation on Stochastic Local Search for Decentralized Asymmetric Multi-objective Constraint Optimization Considering Worst Case	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 462-469
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5220/0010395504620469	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 松井俊浩	4. 巻 1
2. 論文標題 非集中型の非対称制約最適化における漏洩情報抑制の一検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020年度人工知能学会全国大会 (第34回) 論文集	6. 最初と最後の頁 1P4-GS-7-04
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 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 -
1. 著者名 福田悠也, 松井俊浩	4. 巻 1
2. 論文標題 在宅勤務と欠勤者を考慮するシフトスケジューリング問題の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年電子情報通信学会総合大会情報・システム論文集	6. 最初と最後の頁 60
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 無
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 岡 大貴, 松井俊浩	4. 巻 1
2. 論文標題 分散制約最適化のための進化的計算と確率的探索の併用の一検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021年電子情報通信学会総合大会情報・システム論文集	6. 最初と最後の頁 66
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 無
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 Toshihiro Matsui	4. 巻 1
2. 論文標題 A Study of Cooperation with Privacy Loss Based on Asymmetric Constraint Optimization Problem Among Agents	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 3rd International Conference on Advances in Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 127-134
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3369114.3369145	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 松井 俊浩, マリウス シラギ, 平山 勝敏, 横尾 真, 松尾 啓志	4. 巻 vol. 60, no. 10
2. 論文標題 最短経路探索問題のための動的計画法へのコスト平準化の指標の適用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1603-1616
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 該当する

1. 著者名 Toshihiro Matsui	4. 巻 1
2. 論文標題 Reinforcement Learning Considering Worst Case and Equality Within Episodes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 335-342
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 Toshihiro Matsui	4. 巻 1
2. 論文標題 Study on Applying Decentralized Evolutionary Algorithm to Asymmetric Multi-objective DCOPs with Fairness and Worst Case	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proc. the 14th International Conference on Agents and Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 417-424
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5220/0010919500003116	査読の有無 無
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 松井俊浩	4. 巻 2
2. 論文標題 分散制約最適化問題のための解集合を非集中管理する進化的計算手法の検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 情報処理学会第84回全国大会論文集	6. 最初と最後の頁 43-44
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 無
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 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Toshihiro Matsui
2. 発表標題 A Study on Negotiation for Revealed Information with Decentralized Asymmetric Multi-objective Constraint Optimization
3. 学会等名 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Toshihiro Matsui
2. 発表標題 Investigation on Stochastic Local Search for Decentralized Asymmetric Multi-objective Constraint Optimization Considering Worst Case
3. 学会等名 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井俊浩
2. 発表標題 非集中型の非対称制約最適化における漏洩情報抑制の一検討
3. 学会等名 2020年度人工知能学会全国大会(第34回)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福田悠也, 松井俊浩
2. 発表標題 在宅勤務と欠勤者を考慮するシフトスケジューリング問題の検討
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岡 大貴, 松井俊浩
2. 発表標題 分散制約最適化のための進化的計算と確率的探索の併用の一検討
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松井俊浩
2. 発表標題 非対称制約最適化問題に基づく複数エージェントの協調におけるプライバシ漏洩抑制の一検討
3. 学会等名 合同エージェントワークショップ&シンポジウム2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiro Matsui
2. 発表標題 A Study of Cooperation with Privacy Loss Based on Asymmetric Constraint Optimization Problem Among Agents
3. 学会等名 3rd International Conference on Advances in Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiro Matsui
2. 発表標題 Reinforcement Learning Considering Worst Case and Equality Within Episodes
3. 学会等名 12th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshihiro Matsui
2. 発表標題 Study on Applying Decentralized Evolutionary Algorithm to Asymmetric Multi-objective DCOPs with Fairness and Worst Case
3. 学会等名 14th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松井俊浩
2. 発表標題 分散制約最適化問題のための解集合を非集中管理する進化的計算手法の検討
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Toshihiro Matsui
2. 発表標題 Anytime Evolutionary DCOP Algorithm with Distributed Solution Stores
3. 学会等名 16th International KES Conference on Agents and Multi-Agent Systems Technologies & Applications (国際学会)
4. 発表年 2022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