

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 27 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26730005

研究課題名(和文) インセンティブを考慮したアルゴリズム設計の基礎理論

研究課題名(英文) A Theory of Algorithm Design with Incentives

研究代表者

東藤 大樹 (Todo, Taiki)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・助教)

研究者番号：50708394

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：個人配分問題として物々交換とケーキ分割を扱い、ダミー入力への耐性を有するアルゴリズムについて議論した。また、物々交換に関しては、計算複雑性に基づくダミー入力への耐性の代替概念を提案した。社会的決定問題としては施設配置を扱い、同質な2つの施設を直線上に配置するモデルにおいて、ダミー入力への耐性を有する配置アルゴリズムの特徴付けに成功した。さらに、選択順序と呼ばれる数理モデルに確率の概念を導入し、いくつかの計算問題が多項式時間で解けることを示した。これらの研究成果は、人工知能分野で最難関の国際会議である AAAI, AAMAS, IJCAI などに採択され、口頭発表を行った。

研究成果の概要(英文)：During this research project, we investigated the effect of dummy input in various algorithms. For individual allocation problems, we consider both barter exchange and cake cutting. We also define a weaker notion of resistance, based on computational complexity, against dummy input and showed that a simple extension of the top-trading-cycles algorithm satisfies it. For social decision problems, we dealt with location of two identical facilities on a line. We successfully characterized the behavior of algorithms that is resistant to dummy input. Furthermore, we provided several complexity results for a variant of picking sequence problem, in which the sequence is randomly determined.

Some of these contributions appeared in proceedings of top-tier AI conferences, such as AAAI, AAMAS, and IJCAI, and presented at the venues.

研究分野：人工知能

キーワード：ゲーム理論 アルゴリズム設計 マルチエージェントシステム ミクロ経済学

1. 研究開始当初の背景

大規模なネットワーク上のサービス/アルゴリズムには、不特定多数のユーザが参加する。このときアルゴリズムが入力として受け取るデータは、複数の利己的なユーザ/データプロバイダによって供給されると考えられる。従来のアルゴリズム設計では、データ供給者の利己的行動という概念はほとんど考慮されていなかった。

特に、アルゴリズムにおけるダミー入力の影響の解析は研究事例が少なく、ダミー入力に耐性を持つ(=どのユーザもダミーのデータを供給するインセンティブを持たない)アルゴリズムの設計の指針が不足していた。より詳細には、ダミー入力を行うインセンティブを持つユーザが存在しないのは、どのような問題において、どのようなアルゴリズムを用いた場合か、未解明である。特に経済学・ゲーム理論分野では扱われない学習やソートなどのアルゴリズムに関しては、先行研究はほとんど存在しない。

また、経済学・ゲーム理論分野の経済アルゴリズムも含め、ダミー入力に耐性を持つアルゴリズムに関する研究では、肯定的な結果はほとんど得られていない。サービス側・アルゴリズム実装側の視点では、例えばダミー入力に耐性を持つアルゴリズムは存在しない、という否定的な結果のみを得ても、対応のしようがない。理論研究が実社会に還元されるためには、否定的な結果を得たのち、肯定的な結果を得る手法に関して、一般性を多少犠牲にしても、なんらかの指針を与えることが重要である。

本研究課題は、アルゴリズム設計において、ユーザ/データプロバイダのインセンティブを考慮する国内で初の事例となる。アルゴリズムとメカニズムの類似性に着目し、アルゴリズム設計にゲーム理論、特に均衡の概念を導入して解析を進める点が、従来のアルゴリズム設計理論と異なる。ユーザの不正のインセンティブを取り除き、社会全体に望ましい結果を、均衡として出力するアルゴリズムの設計のための基礎理論であり、特に、アルゴリズム設計におけるダミー入力を考慮する点は、世界初の試みである。

本研究課題の遂行により、ユーザがアルゴリズムへ供給するデータの信頼性が保証される。よって、データの再利用の可能性が広がり、より効果的なサービス・アルゴリズムの開発が可能となると考えられる。また、アルゴリズム設計とゲーム理論の融合を通じて、計算機科学とミクロ経済学という分野間の相互交流が活発になると予想する。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、ユーザのインセンティブを考慮し、各ユーザが正直に入力を与える(=正しいデータを供給する)アルゴリズムの設計理論の基礎を構築することである。そのために、アルゴリズム設計に、ゲーム理論

/ミクロ経済学の概念を導入し、ユーザの行動を数理的にモデル化する。特に、架空のアカウントによるダミーデータの供給など、匿名性を利用した不正行為に注目し、ユーザが不正を行うインセンティブが生じないようなアルゴリズムに関する知見を得る。

より詳細には、対象とする問題を個人配分問題と社会的決定問題に分類し、それぞれ特徴的なアルゴリズムを取り上げて研究を遂行する。まず、アルゴリズムのダミー入力への耐性の定式化と、アルゴリズムがダミー入力に耐性を持つための必要十分条件の解明を目指す。アイデアとして、アルゴリズムをミクロ経済学の概念であるメカニズムとして捉え、ダミー入力に耐性を持つアルゴリズムの設計の指針とする。

さらに、アルゴリズムの結果を望ましいものとする追加条件を解明する。多くの場合、ダミー入力に耐性を持つアルゴリズムでは解の効率性が非常に悪くなると予想される。そこで、ユーザの行動や問題設定に制限を導入することを考える。具体的には、どの程度自然な制限のもとで、優れた解を出力するアルゴリズムが設計可能であるかを解明する。

3. 研究の方法

本研究課題ではまず、アルゴリズムにおける各ユーザの効用 (utility) を定義し、ユーザのインセンティブを数理的にモデル化する。その後、マッチングアルゴリズムと施設配置アルゴリズムに着目して研究を遂行する。マッチングは個人配分問題、施設配置は社会的決定問題のそれぞれケーススタディとなっており、いずれも申請者による先行研究が存在する。まず、アルゴリズムがダミー入力に耐性を持つための必要十分条件を解明する。そして、より肯定的な結果を得るために、追加の条件の導入を試みる。

研究の進捗状況に応じて、柔軟に計画を変更する。例えば、よく知られた、あるいは単純なアルゴリズムに焦点を絞り、そのアルゴリズムがダミー入力に耐性を持つか否かの検討を主に行うなどする。焦点を絞ることで一般性は失うが、ダミー入力に耐性を持つアルゴリズム設計の基礎となるアイデアを得ることができる。また、マッチングの代わりにソーティングやナップサック、施設配置の代わりに学習や情報統合など、構造の近い別の問題を先に扱うことも考える。

4. 研究成果

(1) 個人配分問題の例として取り上げたマッチングに関して、その特殊ケースである物々交換問題に限定して議論を行った。各ユーザが複数の非分割財を保有する物々交換において、パレート効率性と個人合理性を満足する範囲では、厳密な意味でダミー入力への耐性を有するアルゴリズムが存在しないことを示した。一方、肯定的な結果として、よく知られたトップトレーディングサイクル

ルアルゴリズムの単純な拡張のもとで、在るユーザがダミー入力を含む操作によって効用を増加できるか否かの判定問題が NP-complete であることを示した。すなわち、ユーザの計算能力が限定されている環境においては、トップトレーディングサイクルアルゴリズムの単純な拡張が、様々な望ましい性質を満足するアルゴリズムの一つであると言える。この研究成果は、人工知能分野の国際会議 AAAI-15 にフルペーパーとして採択され、口頭発表を行った[学会発表 5]。

複数財交換の理論は、近年注目を集めている生体肺移植などへの応用の可能性がある、重要な研究課題である。今後の展望として、ユーザが所有不可能な非分割財を持つケースにも適用可能なアルゴリズムの開発が挙げられる。また、条件付き辞書的選好 (conditionally lexicographic preference) という選好モデルへ、提案したアルゴリズムを拡張することも考えている。

(2) 物々交換問題において、虚偽のデータを入力するインセンティブが生じないアルゴリズムの存在条件を検討した。具体的には、財に関する全てのユーザの好み (= データ) が、ある共通の順序に基づくものに限定されていても、加法的拡張 (additive extension) と呼ばれる選好モデルのもとでは、任意のアルゴリズムにおいて虚偽のデータ入力のインセンティブが必ず生じることを示した。その一方で、辞書的拡張 (lexicographic extension) と呼ばれる選好モデルのもとでは、虚偽のデータ入力のインセンティブが生じないアルゴリズムを設計可能であることを示した。さらに、ユーザの好みが増限されている場合には、既知の定理が適用できなくなることを、反例を用いて示した。この研究成果は、国際会議 IJCAI-15 にフルペーパーとして採択され、口頭発表を行った [学会発表 3]。

ユーザの好みが増限されているケースに関する検討は、ミクロ経済学における自然なアプローチである。特に、全てのユーザの好みがある種の類似性を持つケースは、投票理論に関する研究において広く行われてきた。本研究は、物々交換の理論において、このような好みの類似性を取り入れた初の理論的成果である。今後の課題として、虚偽のデータ入力のインセンティブが生じないような、ユーザの好みの類似性を明らかにする (必要十分条件を求める) ことを考えている。

(3) 個人配分問題の別の例として、ケーキ分割問題を扱った。自然な仮定のもとで、任意の確率的分割アルゴリズムにおいて、ダミー入力への耐性と公平性が両立しないことを示した。より詳細には、ダミー入力への耐性と無羨望性 (envy-freeness) との非両立性を示した。その一方で、ダミー入力への耐性を弱めた性質を提案し、この性質と無羨望性

と両立する確率的分割アルゴリズムを提案した。この研究成果は、マルチエージェントシステム分野の国際会議 AAMAS-16 にフルペーパーとして採択され、口頭発表を行った [学会発表 4]。

今後の展望として、ダミー入力を不正に行う際のコストを導入することを考えており、既に検討を始めている。コストの導入により、ダミー入力への耐性を有するための条件が緩和され、より柔軟なアルゴリズムを設計可能となると予想される。

(4) 二人のプレイヤーが、決められた順序に従って非分割財を選び取る、選択順序問題という数理モデルにおいて、順序をランダムに決定する拡張ケースを考察した。ある財の集合が獲得可能となる順序が存在するか否か、および、順序がどのように決まっても獲得可能であるか否か、のいずれの判定も多項式時間で可能であることを示した。さらに、最適な戦略の探索が多項式時間に収まることを示した。本研究成果は、国際会議 AAMAS-16 にフルペーパーとして採択され、口頭発表を行った [学会発表 1]。

提案モデルは、日本プロ野球によるドラフト制度などの数理モデルと考えることができ、利害関係のある複数の人々が逐次的に意思決定を行う際の基礎理論として重要である。今後の展望としては、順序のランダムな決定方法に関する議論が必要である。例えば、二人のプレイヤーを『公平に』扱いたい場合に、順序の決定方法がどのような条件を満足すれば公平と呼べるか、といった、規範的立場での議論を行うことを考えている。

(5) 社会的決定問題の例として取り上げた施設配置問題に関して、直線上に同質な二つの施設を配置するモデルを扱った。各ユーザが高々一つの施設にアクセスするという仮定のもとで、パレート効率性、匿名性、およびダミー入力への耐性を有するアルゴリズムの出力結果の特徴付けに成功した。また、円周上への配置モデルについても考察を行い、ダミー入力への耐性を有するアルゴリズムの動作の特徴付けに成功した。さらに、提案アルゴリズムの近似率を解析した。本研究成果は、国際会議 AAAI-16 にフルペーパーとして採択され、口頭発表を行った [発表論文 2]。

施設配置のモデルは、アルゴリズム的ゲーム理論の分野で広く研究がなされており、ダミー入力に関して初の検討を行った本研究のインパクトは大きいと考える。今後の課題として、ユーザが施設に対して、『好き』か『嫌い』の2値の好みから一つを選んで入力する場合には、虚偽の入力を行うインセンティブの生じない配置アルゴリズムの提案を考えている。また、乱択アルゴリズムの提案や、提案アルゴリズムの近似率解析も重要な課題である。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計0件)

〔学会発表〕(計5件)

1. Yuto Tominaga, Taiki Todo, and Makoto Yokoo. Manipulations in Two-Agent Sequential Allocation with Random Sequences. In Proceedings of the Fifteenth International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2016), Singapore, pages 141-149, May 2016.
2. Akihisa Sonoda, Taiki Todo, and Makoto Yokoo. False-name-proof locations of two facilities: Economic and algorithmic approaches. In Proceedings of the Thirtieth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2016), Phoenix, Arizona, US, pages 615-621, February 2016.
3. Zhaohong Sun, Hideaki Hata, Taiki Todo, and Makoto Yokoo. Exchange of indivisible objects with asymmetry. In Proceedings of the Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 2015), Buenos Aires, Argentina, pages 97-103, July 2015.
4. Shunsuke Tsuruta, Masaaki Oka, Taiki Todo, Yuko Sakurai, and Makoto Yokoo. Fairness and false-name manipulations in randomized cake cutting. In Proceedings of the Fourteenth International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS 2015), Istanbul, Turkey, pages 909-917, May 2015.
5. Etsushi Fujita, Julien Lesca, Akihisa Sonoda, Taiki Todo, and Makoto Yokoo. A complexity approach for core-selecting exchange with multiple indivisible goods under lexicographic preferences. In Proceedings of the Twenty-Ninth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2015), Austin, Texas, US, pages 907-913, January 2015.

〔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〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/taikitodo/2014wakateb>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

東藤 大樹 (TODO, Taiki)

九州大学・システム情報科学研究所・助教

研究者番号: 50708394

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: