

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23650073

研究課題名（和文） 最適化と法則発見を用いた集団合意形成ルールの自動設計

研究課題名（英文） Automated design of social choice rules by optimization and rule extraction

研究代表者

横尾 真 (YOKOO MAKOTO)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号：20380678

研究成果の概要（和文）：

本研究の目的は、自動メカニズム設計と発見科学における法則発見の技術を組み合わせることにより、小規模な（部分）問題に対する自動メカニズム設計と、得られた結果からの法則発見を繰り返し実行し、大規模な問題に適用可能なルールを自動設計する方法を開発することである。本研究では、この目的を達成するための重要な要素技術である、自動メカニズム設計の結果から、望ましい性質を満たすメカニズムのルールを自動的に抽出するアルゴリズムを開発した。本研究の成果に関して情報科学技術フォーラムで発表を行い、最優秀論文賞である船井ベストペーパー賞を受賞している。さらに、従来の自動メカニズム設計では、最適化手法として混合整数計画法を用いており、入力である参加者のタイプを離散値で表現することが必要であったが、非線形で連続な変数を扱うことができる限量記号消去法と呼ばれる最適化手法を用いることにより、メカニズムのルールを直接求める方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

The goal of this research project is to develop a method for automatically generating social choice rules that can be applied to large-scale problem instances by combining existing automated mechanism design techniques (which can be applied only for small-scale problem instances) and rule discovery techniques. In this research, we first develop an important core technology for achieving this goal, i.e., a method for extracting social choice rules that satisfy desirable properties based on the results obtained by automated mechanism design. This result was presented at Forum on Information Technology (FIT) and obtained the best paper award (Funai best paper award). Furthermore, the existing automated mechanism design techniques use integer programming to obtain optimal rules for a given criterion. As a result, the types of participants must be represented as a set of discrete values. We develop a new method for directly obtaining social choice rules based on another optimization technique called quantifier elimination, which can handle non-linear, continuous variables.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：人工知能・マルチエージェントシステム

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

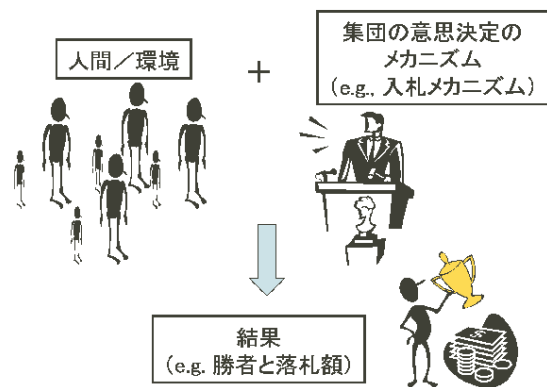
キーワード：ゲーム理論，最適化，メカニズムデザイン，オークション，架空名義操作

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

ある環境に存在する人間の集団に対して、集団としての意思決定のルール／メカニズムを導入すると、何らかの社会的な結果が得られる(図 1)。望ましい結果を得るためのメカニズムの設計方法に関する研究はメカニズム／制度設計と呼ばれ、ゲーム理論／ミクロ経済学の一分野として活発な研究が行われている。メカニズム設計に関する著名な研究成果として、1996 年にノーベル経済学賞を受賞した W. Vickrey による第二価格入札に関する研究がある。第二価格入札とは、例えば、ある商品に関して、10 万円、7 万円の入札があった場合、最も高い 10 万の入札をした入札者が勝者となるが、その際に支払う金額を二番目に高い 7 万とするものである。この入札メカニズムを用いた場合、各参加者は自分が支払う意思のある上限の金額を入札すれば、すなわち正直に行動すれば自分の利益を最大化できる。

第二価格入札は、理論的に優れた性質を持つにも関わらず広く用いられるには至らなかった。ところが、近年、検索エンジンでのキーワード広告において第二価格入札が用いられるようになり、今や第二価格入札は世界中でもっとも頻繁に実行されている入札方式となっている。このように、ソフトウェア／エージェントが主要な構成要素となっている、ネットワーク上で繰り返し実行されるメカニズムにおいては、理論的な安定性が極めて重要となる。このようなメカニズム設計は人手によって行われてきたが、近年、メカニズム設計を最適化問題として定式化し、整数計画法を用いてメカニズムを自動設計するアイデアが提案されている(文献 1)。



メカニズム設計の目的:  
望ましい結果を与えるメカニズムを設計すること

図 1 メカニズム設計の概要

具体的には、メカニズムを入力(参加者のタイプの集合)と出力(財の割当てと支払額)の関係を示す表であると考えられる。さらに、表の各項目を整数計画法の変数とし、制約条件(正直に行動することが最適)の元で、参加者の利益や収入の最大化を目的関数として最適解を求める。しかしながら、整数計画法を用いた自動メカニズム設計では表の項目数／変数の数は参加者数に関して指数的に増加し、ごく小規模な問題にしか対応できないという問題があった。

2. 研究の目的

本研究では自動メカニズム設計と発見科学における法則発見の技術(文献 2)を組み合わせることにより、小規模な(部分)問題に対する自動メカニズム設計と、得られた結果からの法則発見を繰り返し実行し、大規模な問題に適用可能なルールを自動設計する方法を開発する。

本研究は、最適化／自動メカニズム設計と発見科学という二つの独立な研究領域をつなぐ研究であり、これらの研究分野のさらなる活性化が期待できる。本研究により、参加者数が多数である場合でも、望ましい集団意思決定ルールを自動的に設計することが可能となる。

3. 研究の方法

最初のケーススタディとして、架空名義入札と呼ばれる不正行為に対して頑健性を持つオークションメカニズムの設計を例題として、法則発見の技術を用いたメカニズムの自動設計に取り組む。まず、既存のメカニズムにおけるルールを再発見することを目標として、ルールの自動抽出方法を開発し、次に未知データに対して開発したルール抽出方法を適用して、全く新しいオークションメカニズムのルールの獲得を行う。

架空名義入札とは、一人の入札者が複数の名義(例えば複数の電子メールアドレス)を用いて入札を行うことであり、インターネット等の匿名性のある環境では深刻な問題となる。架空名義入札は研究代表者が世界に先駆けて研究を行い、インターネット等の新しい技術によって生じる斬新な問題を指摘したもとして国内外から高い評価を受けている。

本研究ではまず、既存の架空名義入札に頑健なオークションメカニズムの結果をテストデータとして用いて、これらのメカニズムで用いられているルールを再発見することを目的として、ルールの自動抽出方法の検討を行った。特に、正直が最良の策であるという制約条件に着目し、一般性を失わずに望ましいルールの形式を制限する方法について検討した。さらに、候補となる有望なルールを効率的に数え挙げてテストする手法を開発した。このルールの自動抽出方法を、実際の自動メカニズム設計の結果に適用し、オークションメカニズムのルールの自動生成を行った。

さらに、限量記号消去法 (Quantifier Elimination, QE) という最適化手法を用いた自動メカニズム設計の方法 (QE-AMD) を提案した。QE は多項式等式・不等式・限量記号・ブール演算からなる一階述語論理式を入力とし、等価で限量記号を含まない式を導く算法である。出力される式は入力式が真となる限量記号のない変数の領域となる。QE-AMD は、参加者のタイプを限量記号を用いて表現し、候補となるルールを多項式関数として表現することで、評価値の連続性を保持したまま自動メカニズム設計が実行可能となる。QE-AMD は入力式から限量記号を消去し、入力式が真となる多項式の係数の範囲を出力する。得られた多項式は一般的なルールとなっており、整数計画法を用いる場合に必須であった結果を解析して一般的なルールが抽出する処理が不要となっている。この結果、従来は複雑すぎて扱えなかった状況においても、望ましいルールの生成が可能になることが予想される。

#### 4. 研究成果

当初の計画に挙げた「既存の架空名義入札に頑健なオークションメカニズムの結果をテストデータとして用いて、これらのメカニズムで用いられているルールを再発見する」という目的は十分に達成された。提案手法により、架空名義操作の影響を受けない代表的なメカニズムである適応的留保価格メカニズムと等価なルールの抽出に成功している。この成果に関して情報科学技術フォーラムで発表を行い、最優秀論文賞である船井ベストペーパー賞を受賞した。

さらに、架空名義入札に頑健なオークションの設計以外の問題、無羨望性 (他者の割当を羨むことがないという性質) を満たすオークションや、参加者がオークションの主催者を兼ねており、勝者の支払額の再配分が必要とされるオークションのルール設計等の検討

を行った。全く新しいルールを自動的に獲得するという目的を達成するには至らなかったが、結果の解析の過程で得られた知見を生かして、これらの設定において望ましい性質を持つ新しいルールを提案することができた。

また、QE-AMD を用いて、2人1財オークションに関して、参加者が嘘をつく誘因を持たないルールの範囲を求め、この範囲において社会的余剰を最大化するメカニズムは、良く知られた Vickrey-Clarke-Groves (VCG) メカニズムと等価となり、オークション主催者の収入の期待値を最大化するメカニズムは、Myerson メカニズムと等価となることを確認した。さらに、より複雑な問題設定や制約条件の元でのルールの生成と検証を進めている。

本研究に関連する成果として雑誌論文4件、難関国際会議7件、国内会議4件の論文を発表している。先に述べた船井ベストペーパー賞を含め3件の受賞があり、国内外で高く評価されている研究成果が得られたと自負している。

- (1) T. Sandholm, Automated Mechanism Design: A New Application Area for Search Algorithms, Int. Conf. on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-2003), 2003.
- (2) 森下真一, 宮野悟(編), 発見科学とデータマイニング, 共立出版, 2001

#### 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4件)

- ① 東藤大樹、岩崎敦、横尾真、収入単調性を満たすオークションメカニズムの特性及びその架空名義操作不可能性との関係、人工知能学会論文誌、査読有、26巻(1)、2011、86-96  
DOI:10.1527/tjsai.26.86
- ② 桂木敦史、櫻井祐子、岩崎敦、横尾真、第一価格入札における架空名義入札の影響の解析、人工知能学会論文誌、査読有、26(1)巻、2011、199-207  
DOI:10.1527/tjsai.26.199
- ③ 上田俊、北木真、岩崎敦、横尾真、協力ゲームにおける特性関数のエージェントのタイプに基づく簡略表記法、電子情報通信学会論文誌、査読有、J94-D(11)、2011、1716-1728
- ④ 一村良、長谷川隆人、上田俊、岩崎敦、

横尾真、MC-nets を用いた提携構造形成アルゴリズムの拡張：負の利得と外部性の導入、電子情報通信学会論文誌、査読有、J94-D(11)、2011、1707-1715

〔学会発表〕(計11件)

- ① 岩崎敦、多項式表現と限量記号消去によるメカニズム設計の自動化、計測自動制御学会 第13回制御部門大会、2013年3月8日、福岡
- ② 杉町勇和、岩崎敦、横尾真、穴井宏和、オークションメカニズムの多項式表現と限量記号消去法を用いたメカニズム設計の自動化、日本オペレーションズ/リサーチ学会 2012年秋季研究発表会、2012年9月16日、神戸
- ③ T. Todo, T. Mouri, A. Iwasaki and M. Yokoo, False-name-proofness in Online Mechanisms, The 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2012), 2012年6月8日、バレンシア (スペイン)
- ④ S. Ueda, D. Fragiadakis, A. Iwasaki, P. Troyan and M. Yokoo, Strategy-proof Mechanisms for two-sided Matching with Minimum and Maximum Quotas, The 11th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2012), 2012年6月4日、バレンシア (スペイン)
- ⑤ Y. Sakurai, S. Ueda, A. Iwasaki, S. Minato and M. Yokoo, A Compact Representation Scheme of Coalitional Games Based on Multi-Terminal Zero-Suppressed Binary Decision Diagrams, 14th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent System (PRIMA-2011), 2011年11月17日、Wollongong (オーストラリア) (best paper award)
- ⑥ S. Ueda, D. Fragiadakis, P. Troyan, A. Iwasaki and M. Yokoo, Laboratories / students problem with minimum/maximum quotas, Second International Joint Agent Workshop & Symposium (iJAWS2011), 2011年10月28日、熱海 (iJAWS best paper award)
- ⑦ 上田俊、岩崎敦、横尾真、配属人数下限付き研究室配属問題、第10回情報科学技術フォーラム (FIT2011)、2011年9月9日、函館
- ⑧ 毛利貴之、杉町勇和、東藤大樹、岩崎敦、横尾真、自動メカニズムデザインを利用した組合せオークションのルール抽出アルゴリズムの提案、第10回情報科学技術フォーラム (FIT2011)、2011年9

- 月7日、函館 (船井ベストペーパー賞)
- ⑨ T. Todo, R. Li, X. Hu, T. Mouri, A. Iwasaki and M. Yokoo, Generalizing Envy-Freeness toward Group of Agents, 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2011), 2011年7月17日、バルセロナ (スペイン)
  - ⑩ T. Todo, A. Iwasaki and M. Yokoo, False-name-proof Mechanism Design without Money, 10th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent System (AAMAS-2011), 2011年5月4日、Taipei (中国)
  - ⑪ A. Iwasaki, A. Katsuragi and M. Yokoo, False-name bidding in first-price combinatorial auctions with incomplete information, 10th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent System (AAMAS-2011), 2011年5月4日、Taipei (中国)

〔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

<http://agent.inf.kyushu-u.ac.jp/~yokoo/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

横尾 真 (YOKOO MAKOTO)

九州大学・システム情報科学研究院・教授  
研究者番号：20380678

### (2) 研究分担者

岩崎 敦 (IWASAKI ATSUSHI)

九州大学・システム情報科学研究院・助教  
研究者番号：30380679