

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：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540118

研究課題名(和文) 限量子消去法を用いたパラメトリックメカニズム設計技術の確立

研究課題名(英文) Foundation of Parametric Mechanism Design Technique via Quantifier Elimination

研究代表者

横尾 真 (YOKOO, MAKOTO)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・教授)

研究者番号：20380678

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、パラメトリックメカニズム設計という、メカニズム自動設計の新しいフレームワークを提案した。提案したフレームワークは、限量子消去法を内部で動作させることにより、与えられた制約を満足するパラメータの範囲を導出する。各入札者が予算制約を持つ単一財オークションについて、提案手法を用いることにより、誘因両立的かつ主催者収入を最大化する、非自明なオークションメカニズムの設計に成功した。研究成果について、マルチエージェントシステム分野で最難関の国際会議である AAMAS にてポスター発表を行った。

研究成果の概要(英文)：In this project, we propose an alternative automated mechanism design approach called parametric mechanism design via quantifier elimination (PMD-QE), which utilizes QE, a symbolic formula manipulation technique. In PMD-QE, we first develop a skeleton of mechanisms, which is characterized by a set of parameters, e.g., critical values for auction. The range of parameters where the given constraints are satisfied is automatically identified by QE. To demonstrate the potential of this idea, we identified a non-trivial dominant-strategy incentive compatible mechanism that maximizes the seller's revenue by appropriately setting those parameters, for a setting where a bidder has a publicly known budget limit.

Some part of the contribution appeared in the proceedings of AAMAS-15, which is the top-tier international conference in the field of multi-agent systems, and presented at a poster session.

研究分野：人工知能

キーワード：マルチエージェントシステム ゲーム理論 限量子消去法 オークション

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。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、自分の利益を最大化できる(誘因両立性)。

従来、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。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、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、社会的な最適性や収入の最大化を目的関数として最適解を求めるアプローチである。

この際、本来は連続、もしくは多数の可能性がある参加者のタイプ(オークションなら商品の価値)を、ごく少数の離散的な候補値に絞ることで、整数計画法によって最適解を得ることが可能となっていた。例えば、本来の評価値が0から100の間の任意の整数値である場合に、非常に高い値である100、中間的な値である50、非常に低い評価値である0の三通りの可能性に限って最適化を行うといったことが必要であった。このため、自動メカニズム設計の結果は絞り込みを行った特定の入力に特化して最適化されており、必ずしも一般的なルールが得られるとは限らない。

さらに従来のアプローチでは、このような代表的な値に対する整数計画法の出力結果を、人間が解析して一般的なルールを求めようとしていた。しかしながら、表の項目が数百から数千程度となった場合、人手により結果を解析し一般的なルールを得ることは非常に困難となる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、理論的な安定性を保証する、集団での合意形成ルール(例えばオークションのルール)を、従来、人文社会系、すなわちミクロ経済学およびゲーム理論分野で研究されてきたメカニズム設計理論の成果と、理工系、すなわち計算機科学および数式処理分野で研究されてきた限量子消去法を組み

合わせることで、自動的に設計することにある。より詳細には、メカニズム設計理論の成果を用いて、望ましい性質を満たす骨格となる抽象的なメカニズムの記述を与え、メカニズムが実現可能となるように、メカニズムを記述するパラメータの範囲を限量子消去法によって求める、パラメトリックなメカニズム設計と呼ばれる新しいメカニズム設計技術を確立する。

本研究は、人文社会系のメカニズム設計理論と理工系の数式処理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、大規模な問題に対しても適用可能な望ましい性質を満たす一般性のある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

本研究が対象とするパラメトリックメカニズム設計では、まず、メカニズム設計理論で得られた知見を用いて、骨格となるメカニズムの抽象的な記述を得る。例えば、上記の一つの商品に関するオークションにおいて誘因両立性、すなわち正直な行動が最適となることを保証するためには、各参加者 i に対して、自分の評価値とは無関係に決定される閾値価格 cv_i が定義され、参加者 i の評価値が閾値価格 cv_i を超えている場合には i が勝者となり、 cv_i を支払うことが、必要十分条件であることが知られている。

ここで、例えば cv_1 が、もう一人の参加者 2 の評価値 v_2 の線形関数

$$a_1 + b_1 v_2$$

で与えられ、同様に cv_2 が

$$a_2 + b_2 v_1$$

で与えられることを仮定すれば、

$$(a_1, a_2, b_1, b_2)$$

なる4つのパラメータの組でメカニズムが規定される。

さらに、メカニズムが実行可能となるためには、一定の制約条件を満足するように、これらのパラメータの値を決定する必要がある。具体的には、商品は一つだけであるため、二人の参加者が共に商品を得るという状況が生じることは許されない(割当可能性制約)。割当可能性制約は、参加者のすべての可能な評価値の元で、両者の評価値の少なくとも一方が閾値価格以下であること、すなわち、

$$\forall v_1, \forall v_2, (v_1 \leq cv_1) \text{ or } (v_2 \leq cv_2)$$

なる論理式で記述される。

限量子消去法は、限量子を含む論理式を、それと等価な限量子を含まない式に変換する手法であり、例えば

$$\forall x, x^2 + ax + b > 0$$

から，

$$a_2 - 4b < 0$$

を求める．与えられた制約条件に関して限量子消去法を適用することにより，制約条件を満たすパラメータの範囲が与えられる．制約条件を満たす一つのパラメータの組は，一般的な一つのメカニズムに対応し，パラメータの範囲は望ましい性質を満たすメカニズム全体の集合（クラス）となる．

本研究では，ケーススタディを通じて，限量子消去法によるメカニズムの自動設計の基礎理論を確立する．まず既知の結果の再発見を起点とし，未解決課題を解ける規模のパラメトリックメカニズム設計を実現するために，計算上のボトルネックとなる箇所を明確にする．具体的には，メカニズムの抽象的な記述に必要なパラメータ数が比較的少ない，再配分オークションを扱い，既存のメカニズムの自動的再発見を目指す．その後，未解決問題が山積している組合せオークションに対して，パラメトリックメカニズム設計を適用する．例えば主催者の収入の最大化など，優れた性質を持つ未発見のメカニズムの自動生成手法の開発が目標である．また，必要に応じて，いくつかの例題に特化し，限量子消去アルゴリズムの改良も試みる．

4．研究成果

(1) 限量子消去法を用いた自動メカニズム設計手法の確立を目標に，単一財オークションを例題として検討を重ねた．限量子消去法を用いることで，誘因両立性をはじめとする，いくつかの基本的な性質を満足する単一財オークションメカニズムの抽象的な記述方法，すなわちパラメータの範囲によるプロトタイプの実現方法を得た．特に，従来ほとんど検討されていなかった，各入札者が予算制約を持つ単一財オークションにおいて，提案手法をもとに，誘因両立性を満足するオークションメカニズムのプロトタイプを自動生成することに成功した．さらに，パラメータを適切に設定することによって，オークション主催者の期待収入を最大化するオークションメカニズムが得られることを示した．この研究成果の一部は，国際会議 AAMAS-15 にポスター発表として採択された [学会発表 2]．

今後の展望としては，複数の財を同時に販売する組合せオークションのような，より大規模な問題へ対応可能なように，パラメトリックメカニズム設計のフレームワークを拡張することが急務である．また，関連文献の調査を通して得た，マッチングを始めとする，オークションとは異なるメカニズム設計に関する理論的知見を活かし，パラメトリックメカニズム設計をより一般の問題へ適用する方法を検討することも重要である．また，上記ポスター発表を発展させた研究を国際論文誌に投稿する準備を進めている．

(2) 自動メカニズム設計の応用事例の一つとして考察していた，非分割財の配分問題から着想を得て，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ついて研究を行った．順序をランダムに決定する拡張されたモデルを提案し，ある財の集合を選び取れるような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ある財の集合を選び取れるか否か、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．この研究成果の一部は、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]．

今後の展望として，順序のランダムな決定方法に関する保証が挙げられる．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が必要である．

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2件)

1. Atsushi Iwasaki, Etsushi Fujita, Taiki Todo, Hidenao Iwane, Hirokazu Anai, Mingyu Guo, and Makoto Yokoo. Parametric Mechanism Design via Quantifier Elimination (Extended Abstract). In Proceedings of the Fourteenth International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-15), Istanbul, Turkey, pages 1885-1886, May 2015.
2. 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.

[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

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所・主幹
教授
研究者番号：20380678

(2)研究分担者

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

(3)連携研究者

岩崎 敦 (IWASAKI, Atsushi)
電気通信大学・情報システム学研究科・准
教授
研究者番号：30380679