

架空名義入札に頑健な2段階オークションメカニズムの特徴付けと社会的総余剰に関する評価

松尾 徳朗 伊藤 孝行 新谷 虎松

名古屋工業大学大学院工学研究科情報工学専攻

e-mail: {tmatsuo, itota, tora}@ics.nitech.ac.jp

1 はじめに

人工知能やマルチエージェントの分野において、電子商取引やリソースの分配などの問題解決のためにオークションメカニズムの研究が注目を集めている。組み合わせオークションは、広く研究されている重要なオークションの一形態である。

Vickrey-Clarke-Groves (VCG) メカニズムは、入札者が財に対して真の申告をすることが支配戦略となる性質である誘因両立性および割当に関して Pareto 効率性の特徴を持った組み合わせオークションプロトコルである [2]。オークション理論において多くの研究では、誘因両立性の性質を持っているので VCG に焦点が当てられている。

本稿ではまず、架空名義入札に関する定理を示し、架空名義入札に関する特徴を示す。通常の VCG における架空名義入札の問題を解決するために、汎用的に VCG を用いることができる2段階オークションプロトコルを新奇に提案する。本オークションプロトコルは、VCG を行った結果から架空名義入札者を発見する。プロトコルの概要は、大きく分けて次の3つのステップからなる。(1) VCG を行う。(2) 架空名義入札者を仮想的に除外して除外した入札者以外の入札者の効用を計算し、除外しない場合の効用と比較する。この際に、効用に変化のある入札者が架空名義入札者としてリストアップされる。(3) これらの架空名義入札者をグループとして財はセットでグループに割り当てられ、不当な効用の増加を防ぐことを実現する。その後、提案するオークションメカニズムの性質を示し、社会的総余剰に関する評価を示す。

2 準備

2.1 モデル

本稿で提案するメカニズムに関する定義および仮定を示す。オークションへの参加者はオークションおよび入札者とする。オークションは複数の財を準備し、入札者は購入したい財に対し正の評価値を入札する。

- 参加する入札者の集合を $N = \{1, 2, \dots, i, \dots, n\}$ とし、財の集合を $G = \{a_1, a_2, \dots, a_k, \dots, a_m\}$ とする。
- $v_i^{a_k}$ は i 番目の入札者が k 番目の財に対する評価値である (但し, $1 \leq i \leq n, 1 \leq k \leq m$)。
- $v_i(B_i^{a_k, a_l})$ は、入札者 i が財 a_k および a_l の財にバンドルとして入札したときの入札者 i の評価値である (但し, $1 \leq i \leq n, 1 \leq k, l \leq m$)。
- $p_i^{a_k}$ は、入札者 i が財 a_k を落札したときの支払額である。入札者 i がバンドルで入札した商品を落札したとき、支払額は $p_i(B_i^{a_k, a_l})$ のように表される。
- 割当の集合は、 $G = \{(G_1, \dots, G_n) : G_i \cap G_j = \phi, G_i \subseteq G\}$ とする。 G_i は、入札者 i に対する商品の割当である。

仮定 [個人価値の財]: 財の価値は、入札者ごとに異なり、入札者 i のある財 a_k に対する評価値は、他の入札者の評価値に影響を受けないとする。各入札者の評価値は独立である。

仮定 [準線形の効用]: 入札者 i の効用 u_i は、入札者 i に割り当てられる財に対する支払い額 p_i と入札者 i の評価値 v_i の差 $u_i = v_i - p_i$ で表される。このような効用を準線形の効用と呼び、本稿では準線形の効用を仮定する。

Tokuro MATSUO, Takayuki ITO and Toramatsu SHINTANI
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology,
Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya, Aichi, 466-8555 Japan.

2.2 Vickrey-Clarke-Groves Mechanism

Vickrey-Clarke-Groves メカニズムは、入札者が財に対して真の申告をすることが支配戦略となる性質である誘因両立性および割当に関して Pareto 効率性の特徴を持った組み合わせオークションプロトコルである VCG において、まず入札者はオークションに対して、財に対する評価値 $v_i(G_i, \theta_i)$ を申告する。本稿では $v_i(G_i, \theta_i) = v_i(G_i)$ で表す。効率的な割当は、評価値の総和が最大化される割当として計算される。 $G^* = \arg \max_{G=(G_1, \dots, G_n)} \sum_{i \in N} v_i(G_i)$ 。オークションは入札者に支払額を告げる。入札者 i の支払額 p_i は次式で定義される。 $p_i = \sum_{i \neq j} v_j(G_{\sim i}^*) - \sum_{i \neq j} v_j(G^*)$ 。 $G_{\sim i}^*$ は入札者 i 以外のすべての入札者の評価値の総和が最大化される組み合わせである。入札者 i を除いた場合の、他の入札者の評価値の総和が最大化される割当は次式で定義される。 $G_{\sim i}^* = \arg \max_{G \setminus G_i} \sum_{j \in N-i} v_j(G_j)$ 。

2.3 架空名義入札の特徴

オークションにおいて、架空名義を企てるエージェントをスキーマと呼ぶ。スキーマは架空名義入札者が勝者とならない場合は、効用を増加させることはできない。つまり、複数の架空名義入札者およびそれらをたてたスキーマが勝者にならない場合は、効用を増加させることはできない [1]。以下にこの特徴を示す。定理 [スキーマの効用増加]: スキーマは、架空名義入札者がオークションに勝たない場合、効用を増加させることはできない。証明: 以降の議論のスペースを確保するため、本稿では省略する。系 [架空名義入札者の支払額]: すべての架空名義入札者の支払額は、架空名義入札者と同一入札者の集合に属する入札者の入札値が用いられる。

3 架空名義入札者の発見と財の割当

前章で示した定理に基づき、仮想的にオークションの入札者の入札値を0にし、敗者にすれば架空名義入札者を行っている場合、他の架空名義入札者の効用が減少する。そこで、組み合わせオークションにおける参加者を擬似的に参加させない場合と実際の結果を比較することで架空名義入札に関わる入札者を発見できる。

提案するアルゴリズムの概要を示す。実際に VCG による財の割当を計算する。勝者の効用を計算する。つぎに、それぞれの勝者に関して仮に参加していない場合のオークションを実施し、財の割当および効用を計算する。実際のオークションと勝者を一人ずつ除外した場合のオークションにおける効用の差を計算し、共通に効用が減少する入札者を探索し、架空名義入札者を発見する。

オークションは架空名義入札者以外の入札者にはそのまま財を割り当て、架空名義入札者グループにはセットで財を割り当てる。ここで、セットで割り当てる理由は、偶然架空名義入札者グループに偽架空名義入札者が含まれている可能性が存在するからである。架空名義入札者ではない入札者が架空名義入札者グループに属している場合、無実の入札者を特定することは不可能である。そこで、財を入札者個人に割り当てるという伝統的なオークション手法ではなく、架空名義そのものに対処するために入札者グループに財をセットで割り当ててを許す。図1に、プロトコル全体の概要を示す。架空名義入札者グループで、財のセットに対して評価値を入札する。プロトコルは、第二価格封緘入札 (Vickrey auction) プロトコルを採用する。もし、架空名義入札者グループに一人でも架空名義入札者が存在するとする。グループに属している架空名義入札者の仲間が一段階目で敗者

1. オークションの参加者は、財に対して評価値を入札する
2. まず、通常のVCGによるオークションを行い、上での勝者の効用を計算する
3. 入札者を一人ずつ除外して、VCGを試み、それぞれの試行における勝者の効用を計算する
4. 1. の効用と 2. の効用を入札者それぞれに関して比較し、効用の差（減少）が存在するような勝者の組を発見する
5. 上記の入札者を、架空名義入札者グループとする
6. 一般入札者 vs. 架空名義入札者グループのオークションを実施
 1. 架空名義入札者グループに属する入札者の評価値をマージする
 2. 架空名義入札者グループに属していない（一般の）入札者には、通常のVCGに基づき財を割り当てる
 3. 架空名義入札者グループに属する入札者に割り当てられる財をセットとして割り当てる。グループとしての支払額を2段階目のオークションにおける留保価格に設定
7. 財のセットに関するオークションを実施する（財のセットに対して入札、プロトコルは第二価格封緘入札）

図 1: メカニズムの概要

となったとしても、財を獲得しないより獲得した方が効用が大きい場合を考える。この場合、グループに属する架空名義入札者は第二ステージオークションでの財のセットに関して、スキーマが持っている財のバンドルの評価値を入札する。もし、評価値が第二ステージオークションにおける留保価格以上の場合、架空名義入札者により財のセットは落札される。このようにすることで、アルゴリズムの特長は架空名義入札者を発見できるだけでなく、VCGの性質をそのまま保つことができる。

4 議論

4.1 プロトコルの性質

提案したメカニズムは (1) 個人合理的である、および (2) 誘因両立的であるの2点の特徴を持っている (1) 個人合理性に関しては、VCGにおける支払額の定義により明らかである (2) 誘因両立性に関して証明すればよい。次の定理を与える。

定理 [誘因両立性]: 提案するメカニズムは誘因両立的である。

オークションメカニズムが誘因両立性を満たすメカニズム構築のフレームワークとして、PORF プロトコルが提案されている [4]。PORF プロトコルに包含されるメカニズムは、誘因両立性であり戦略的に操作不可能である。具体的な証明は、省略するが基本的な方針は、すべてにおいて入札者の評価値は自分の評価値に依存しない、および allocation feasibility に関して示せばよい。

ここで、提案したメカニズムにおけるスキーマが架空名義入札者を作成する誘因を持たないことに関する命題を与える。スキーマの支配戦略は架空名義入札者を作成しないことである。

仮定 [戦略空間]: ここでは、架空名義入札者をするか否かの2種類の戦略空間が存在していると仮定する。

命題 [弱支配戦略]: 提案するメカニズムにおいてスキーマの弱支配戦略は架空名義入札者を作成しないことである。

証明: 省略する。

提案したメカニズムにおいて、入札者が架空名義入札を行ったとしても、行わない場合に比べて効用を増加させることはできない。架空名義入札者グループに属する入札者の評価値がマージされ、架空名義入札を行っていない状況と同じになってしまうためである。現実のインターネットオークションを想定して考えた場合、架空名義入札者を作ろうとすればオークションに参加するためのID取得などを考えれば、多少のコストがかかる。従って、少なくともその状況においては、架空名義入札者を立てないことが強い意味での支配戦略となる。

4.2 評価

提案した2段階オークションメカニズムの社会的総余剰に関する評価を行う。ここでは、通常のVCG、横尾らにより提案されているLDSプロトコル [3] と比較した。

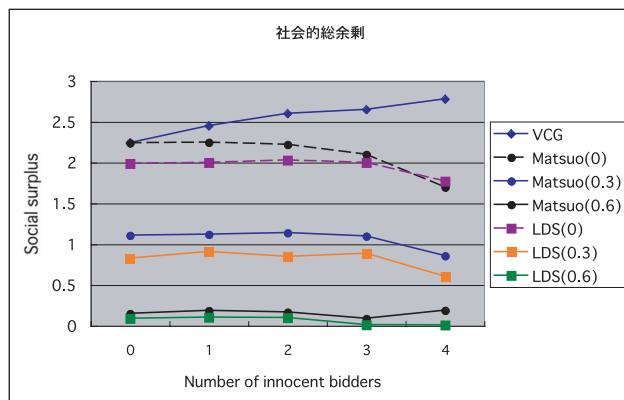


図 2: 実験結果

4つの財がオークションに出品されているとする。入札者の人数を変化させて行った場合のオークションにおける社会的総余剰をシミュレーションした。補完財入札をする入札者1人、スキーマ1人（各財に代替財入札するため分割した入札者は4人）、これら以外の入札者がオークションに参加する人数が0人から4人まで変化する状況を考える。補完財入札は、各財の評価値は0にしておいて、バンドルは仮に補完財入札を行わない場合には各財の評価値が一様分布であるとし、その和を採用する。代替財入札は、ある一つの財は一様分布、それ以外の評価値は0、バンドルは各財の評価値を比較した最大値とする。補完財入札および代替財入札を行う入札者以外の参加を0人から4人に変化した場合の社会的総余剰に関するグラフを図2で示す。グラフにおいて、Matsuoは提案する手法、LSDは文献 [3] のプロトコルで、それに付された数字は売り手の各財に対する留保価格であるとする。ここでは、すべての財に対して同じ留保価格であると仮定する。

グラフで示す通り、与えたオークションの状況では、提案するプロトコルは売り手の留保価格が変化してもLDSより社会的総余剰が高いことが示された。VCGの場合、架空名義入札が防止できていないため社会的総余剰は高い。提案するプロトコルでもLDSでも架空名義入札に対して頑健であるが、LDSプロトコルより提案プロトコルのほうが社会的総余剰に関して優れている。

5 おわりに

VCGにおいて、各入札者を除外して効用比較に基づいた架空名義入札者発見手法を示し、それに基づく2段階オークションメカニズムを提案した。架空名義入札がある場合、架空名義入札者グループに対して財はセットで割り当てられ、不当な効用の獲得の防止を実現した。本メカニズムは、strategy-proofの性質および参加者は架空名義入札を行わない方が支配戦略であることを示した。本稿で示した方法では、既存の架空名義入札に頑健なLDSプロトコルより社会的総余剰に関して優れている。

参考文献

- [1] T. Matsuo, T. Ito, R. W. DAY, and T. Shintani, "A Robust Combinatorial Auction Mechanism against Shill Bidders," Fifth Int'l Joint Conference on Autonomous Agents & Multi-Agent Systems (AAMAS 2006), 2006. (to appear)
- [2] P. Milgrom, "Putting Auction Theory to Work", Cambridge University Press, 2004.
- [3] M. Yokoo, Y. Sakurai, and S. Matsubara, "Bundle Design in Robust Combinatorial Auction Protocol Against False-name bids, 17th Int'l Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2001), pp.1095-1101, 2001.
- [4] M Yokoo, Y. Sakurai, and S. Matsubara, S, "The Effect of False-name Bids in Combinatorial Auctions, New Fraud in the Internet Auctions," Games and Economic Behavior 46(1): pp.174-188, 2004.