

組み合わせオークションにおける効用比較に基づいた

架空名義入札者発見法の提案

A Method of Discovering Shill Bidders based on a Comparison of Bidders' Utilities in Combinatorial Auctions

松尾徳朗[†] 伊藤孝行[‡] 新谷 虎松[†]

Tokuro Matsuo, Takayuki Ito, Toramatsu Shintani

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リソースの効果的な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などが注目を集めている。オークション理論は、近年多くの研究者により注目を浴びている研究分野である。本論文では、組み合わせオークションにおける架空名義入札を防止するために、架空名義を企てるエージェントの発見に関して議論する。

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。組み合わせオークションの参加者は、財を出品するオークションニアと入札を行う入札者（エージェント）であり、入札者は複数の財をバンドルとして入札する。オークションの勝者決定において、一般的には、オークションの参加者全員の効用が最大化される財の割当が効率的であるとされる。しかし、そのような割当を求める場合、財の数および入札者の数が増加すれば、組み合わせ問題の解を探索する必要がある、それは計算困難な問題である。多くの研究では、様々な探索アルゴリズムにより問題解決が試みられている。

一般化 Vickrey オークション (GVA) プロトコルは、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ため GVA に焦点が当てられている。

横尾らは、インターネットオークションにおいて異なる e-mail アカウントを持つことで、架空名義入札が可能となることを指摘している。架空名義入札を行う入札者は、オークションプロトコルが架空名義入札に頑健でない場合に利益を得ることができる。架空名義入札を防止する方法はオークション理論研究が必要とする重要な事項である。

横尾らのアプローチでは、オークションプロトコルやメカニズムを開発することに焦点が当てられている。し

かし、そこでのメカニズムでは架空名義入札に対する頑健性の性質を満たすオークションプロトコルは Pareto 効率性および誘因両立性を満たしていない。

一方、本稿では GVA において架空名義入札を防止するために架空名義入札者を発見する手法を提案する。本論文で提案するアルゴリズムは GVA を行った結果から架空名義入札者が存在しているかどうかを判定する。架空名義入札の可能性があれば、オークションニアは財の割当に関してオークションの取りやめなどの意思決定をすることができる。これは横尾らのアプローチと本質的に異なる。

架空名義入札は、ある 1 人の入札者が自分を含めて 2 人以上の入札者をたてて入札を行うことで、不当な利益を得ることである。従って、架空名義入札者を発見する直接的な方法は、架空名義入札者の入札値をマージしたときに、しないときと比べて効用が減少する入札者を発見することである。しかし、マージに関する基準を設けるためには妥当性のあるマージ関数の定義が必要であり、それは困難であると考えられる。そこで、本稿では入札者の評価値をマージする方法を用いずに、入札者が存在しない場合の他の入札者の効用を分析することで架空名義入札者の発見を行う。架空名義を企てた入札者は、架空名義入札に失敗した場合には、効用を増加させることができないことを示す。以上に基づけば、本稿で示す手法は妥当性があると考えられる。

本稿の構成は以下の通りである。2 章で、定義およびオークションに関して説明する。3 章で、架空名義入札者に関する効用の変化について説明し、評価値をマージする方法の問題点を示す。4 章では本稿において提案する勝者を除外した効用の比較に基づいた方法について説明する。5 章で、オークションニアと架空名義入札者の結託に関して考察する。6 章で、本稿をまとめるとめる。

2 準備

2.1 モデル

本論文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ニア

[†]名古屋工業大学 大学院工学研究科, [‡]DEAS Harvard University

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。

- オークションにおいて、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。

Assumption 1 (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、本論文では準線形の効用を仮定する。

Assumption 2 (評価値の単調性) 入札者が入札する真の評価値に関して、バンドル B および B' (但し、 $B \neq B'$) に対して、 $B \subset B'$ であれば、 $v_i(B, \theta_i) \leq v_i(B', \theta_i)$ が成り立つ。

それぞれの入札者 i は財およびバンドルで表される財の部分集合 $G_i \subseteq G$ に対する選好を持つ。形式的に、それぞれの入札者 i はタイプの集合 Θ において、自らのタイプ θ_i を持つ。そのタイプに基づいて、入札者が割当の集合 G_i を $p_i^{G_i}$ で購入するとき、入札者の効用 $v_i(G_i, \theta_i) - p_i^{G_i}$ が表される (但し、入札者 i のバンドル $G_i \subseteq G$ に対する評価値は $v_i(G_i, \theta_i)$)。

2.2 GVA: Generalized Vickrey Auction

GVA は、Vickrey-Clarke-Groves メカニズムから発展され、架空名義入札が存在しない状況において、誘因両立性および Pareto 効率性の特長を持っている。オークションプロトコルが Pareto 効率であるとは、オークションに参加するすべてのエージェントの効用の総和すなわち社会的総余剰が最大となる性質を持つことである。もし、財の数が一つであるとき、財は最大の評価

値を付けた入札者に割り当てられる。GVA 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。本論文では簡単のため“タイプ”による記述を省略し、 $v_i(G_i, \theta_i) = v_i(G_i)$ 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。

$$G_{\sim i}^* = \arg \max_{G \setminus G_i} \sum_{N-i} v_j(G_j).$$

2.3 スキーマの効用について

本稿では、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、スキーマは、架空名義入札者をおとりにするだけでは効用を増加させることはできず、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。以下の定理によりこの特徴を示す。

Theorem 1 (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。

スキーマを入札者 i とする。オークションにおいて、架空名義入札者が勝者にならないときに入札者 i の効用 u_i は減少しないことを示せば良い。入札者 i が架空名義入札者をたてないときの入札者 i の支払い p_i は $p_i = \sum_{i \neq j} v_j(G_{\sim i}^*) - \sum_{i \neq j} v_j(G^*)$ となる。

入札者 i が架空名義入札者をたてるとき、入札者 i の支払い p'_i は $p'_i = \sum_{i \neq j} v_j(G'_{\sim i}) - \sum_{i \neq j} v_j(G'^*)$ となる。

ここで次の証明では $p_i \geq p'_i$ を示す。オークションにおいて、入札者 i のたてた架空名義入札者がオークションの勝者にならないと仮定する。こ

の場合、オークションにおいて割当の集合は変化しない。つまり、 $G' = G \exists s$ が成立する。 p'_i および p_i の差は次のように示される。 $p'_i - p_i = \sum_{i \neq j} v_j(G'_{\sim i}) - \sum_{i \neq j} v_j(G) - (\sum_{i \neq j} v_j(G'_{\sim i}) - \sum_{i \neq j} v_j(G)) = \sum_{i \neq j} v_j(G'_{\sim i}) - \sum_{i \neq j} v_j(G_{\sim i})$ 。よって、 $\sum_{i \neq j} v_j(G'_{\sim i}) \geq \sum_{i \neq j} v_j(G_{\sim i})$ 。

財の数を m とし、財の集合を $M = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ とする。入札の集合は $B = \{B_1, \dots, B_{i-1}, B_{i+1}, \dots, B_n\} \in G_{\sim i}$ とする。入札の集合は $B' = B \cup \{B'_1, \dots, B'_{n'}\} \in G'_{\sim i}$ とする。集合 $\{B'_1, \dots, B'_{n'}\}$ は架空名義入札の部分集合であるとする。

ここで、割当 $G_{\sim i}$ および $G'_{\sim i}$ は $G_{\sim i} = \max \sum_{x=1}^n p_x y_x$ で表され、 $G'_{\sim i} = \max \sum_{x=1}^{n+n'} p_x y_x$ s.t. $\sum_{x|z \in S_x} y_x \geq 1, \forall z \in \{1, \dots, m\}, y_x \in \{0, 1\}$ となる。よって、 $\max \sum_{x=1}^n p_x y_x \leq \max \sum_{x=1}^{n+n'} p_x y_x$ となり、すなわち、次式が成立する。

$$\sum_{i \neq j} v_j(G'_{\sim i}) \geq \sum_{i \neq j} v_j(G_{\sim i})$$

よって、 $p'_i \geq p_i$ 。 $u_i = v_i - p_i$ とすれば $u'_i \geq u_i$ が成立する。

3 入札者同士の結託の発見

3.1 評価値マージ法

架空名義入札は入札者の効用の変化により発見できる。具体的な発見手法としては、入札者の評価値を、すべての組み合わせにおいて、入札者の評価値をマージすることにより統合する。それぞれにおいてオークションの勝者および効用を計算し、勝者の効用の変化に基づき架空名義入札者を特定するという方法が有効であると考えられる。

架空名義入札は、あるバンドルを複数に分けて、複数の架空名義入札者によりそれぞれ分割して入札された場合に有効となる [1]。分割せずに（つまり架空名義入札者をたてずに）入札した場合と、分割して（すなわち架空名義入札をして）入札し、財を得た場合に、それぞれの効用を計算し、後者の効用が前者より大きい場合に架空名義入札の可能性はある。したがって、以下の手続きで架空名義入札者の発見が可能になる。まず、オークションにおいて入札された評価値に基づき、単純に勝者とペイメントを計算する。計算結果を結果 1 とする。次に、すべての入札者の組み合わせに関して、定義されたマージ関数により評価値をマージし、その場合のオークションの勝者および評価値を計算する。計算結果を結果 2 とする。ここで、結果 1 および結果

2 を比較し、それぞれが同一の勝者の場合に効用の差がある場合が架空名義入札の可能性のある場合である。

しかし、入札者の評価値に対する基準はそれぞれ異なっているため、妥当であると評価される評価値のマージ関数を定義することは困難である。そこで、本稿では入札者をマージするのではなく、Theorem 1 を利用した方法を用いて架空名義入札者を発見する。本稿では、勝者を除外した効用比較による方法と呼ぶ。それぞれの入札者が仮にオークションに参加していないとした場合のオークションの勝者および効用を計算し、勝者の効用の変化に基づき架空名義入札者と特定する。次節に、本稿で提案する架空名義入札者の発見手法の詳細を示す。

3.2 勝者を除外した効用比較による方法

上で示した定理に基づけば、架空名義入札は、それに関わっているできるだけ多くの入札者がオークションの勝者にならない場合は、スキーマーは効用を増加させることができない。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することができる。

本稿で提案する手法ではまず、実際に GVA による財の割当を計算する。勝者の効用を計算する。その後、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、その場合、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全員を除外したオークションを実施し、財を割り当てる。以下に、具体的にアルゴリズムを示す。

[Algorithm] (Step 1) n 人の入札者が参加したオークションにおいて、まず、GVA の方法に基づいて、勝者を決定する。勝者は、評価値の総和が最大化される割当 $G^* = \arg \max_{G=(G_1, \dots, G_n)} \sum_{i \in N} v_i(G_i)$ として計算される。入札者 i の支払額 p_i は $p_i = \sum_{i \neq j} v_j(G^*_{\sim i}) - \sum_{i \neq j} v_j(G^*)$ で定義される。 $G^*_{\sim i}$ 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 $G^*_{\sim i} = \arg \max_{G \setminus G_i} \sum_{N-i} v_j(G_j)$ で定義される。

(Step 2) ここで、勝者の効用が計算される。勝者の集合を簡単のため $W = \{1, 2, \dots, l, \dots, \theta\}$ とする。それぞれの勝者の効用 u_i が格納される。

(Step 3) 入札者 θ が参加しなかった場合のオークションを試みる。割当は、 $G^*_{\sim \theta} =$

$\arg \max_{G=(G_1, \dots, G_n)} \sum_{N-\theta} v_i(G_i)$ となる。

(Step 4) (Step 3) の割当において、実際のオークションにおける勝者 $W = \{1, 2, \dots, \iota, \dots, \theta - 1\}$ に関して、効用を計算する。

(Step 5) 実際のオークションにおけるそれぞれの勝者の効用 u_i から、自分自身が参加しないオークション以外 (例えば、 θ が参加しないオークション) でのそれぞれの勝者の効用 u_i^θ の差 $u_i - u_i^\theta$ を計算する。

(Step 6) (Step 5) において、効用の差 $u_i - u_i^\theta$ が存在する勝者の集合 $\{w_{\sim i}\} \in W$ を発見する。この結果は、格納される。

(Step 7) (Step 6) における結果に関して、 $\{w_{\sim i} \setminus \theta\} \in W = \{w_{\sim \theta} \setminus \iota\} \in W$ のような共通の場合に効用が減少する入札者をリストアップして、オークションニアに送信する。

(Step 8) オークションニアは、入札者 $N \setminus w$ でオークションを再度実施する。

3.3 具体例

本節では、上記アルゴリズムに関して、入札者が5人および2財が出品されているときの具体例を示す。そのうち、1人のスキーマーおよび1人の架空名義入札者が存在する場合を考える。入札者の評価値は以下であるとする。

入札者1の評価値 $v_1(B_1^{a_1, a_2}) : \{8, 9, 17\}$

入札者2の評価値 $v_2(B_2^{a_1, a_2}) : \{9, 8, 17\}$

入札者3の評価値 $v_3(B_3^{a_1, a_2}) : \{12, 0, 12\}$

入札者4の評価値 $v_4(B_4^{a_1, a_2}) : \{0, 12, 12\}$

入札者5の評価値 $v_5(B_5^{a_1, a_2}) : \{0, 0, 20\}$

ここで、勝者は入札者3および4となり、支払額はそれぞれ8となる。 u_3 および u_4 はそれぞれ4となる。

上記アルゴリズムに基づき、勝者3を除外したオークションを行う。この場合、勝者は入札者2および4となり、支払額 p_2 は8、 p_4 は11となる。 u_4 は1となり、効用は減少する。

同様に、勝者4を除外した場合にも同じことが言える。つまり、勝者を除外した場合に、効用が減少する他の勝者が架空名義入札者の可能性があるといえる。

3.4 複数のスキーマー

前章で示した、評価値マージ法においては複数のスキーマーが存在する場合の架空名義入札者の同定は困難である。一方、本論文で提案した勝者を除外した効用比較による方法では、複数のスキーマーが存在する場合においても架空名義入札者の発見は可能である。共通に効用が減少する入札者グループが複数存在する場合は、スキーマーが複数存在していることを表している。

4 オークションニアと入札者の結託

オークションにおいて、入札者どうしが結託したり架空名義入札者をたてたりするだけではなく、オークションニアが関与していることがある。オークションニアと入札者が結託することがある。形式的にオークションは行っているが、カルテルを結んでいる状況である。本状況を分析するには、売り手の total revenue を計算することで発見が可能になる。本稿で示した手法により、架空名義入札者およびスキーマーを発見する。架空名義入札者を除外した場合のオークションの結果を計算する。この際に、大幅に total revenue が減少している場合、オークションニアと入札者が結託している可能性を指摘できる。

具体的に、まず実際のオークションにおいて GVA による勝者が計算される。ここで、オークションのペイメントの合計 $\sum_i^n p_i$ が計算される。前章で示したように、入札者を除外した場合のペイメントの合計 $\sum_{N \setminus \iota} p_i$ を計算する。架空名義入札者を見出す。入札者のペイメント $\sum_{N \setminus w} p_i$ を計算する。この際に、 $\sum_{N \setminus w} p_i$ に対して、 $\sum_i^n p_i$ との差が大きい場合は、total revenue が大幅に減少しているといえる。

5 おわりに

本稿では、組み合わせオークションにおいて架空名義入札を防止するために、架空名義入札者の発見手法を提案した。提案した勝者を除外した効用計算による手法では、入札者の評価値をマージするより効果的にオークションの結果から架空名義入札者の存在を判定することができる。評価値のマージのためのマージ関数に関して妥当性を持ったマージ法を定義することは困難である。本稿で示した方法では、複数のスキーマーが存在する場合においても、架空名義入札者の発見が可能であり、またオークションニアとスキーマーが結託する場合も total revenue を計算することで、結託を発見することが可能となる。

参考文献

- [1] T. Matsuo, T. Ito, T. Shinitani. 組み合わせオークションにおける不正入札者の発見手法について. 第19回人工知能学会全国大会講演論文集, 2005.
- [2] P. Milgrom. *Putting Auction Theory to Work*. Cambridge University Press, 2004.
- [3] M. Yokoo, Y. Sakurai, and S. Matsubara. The effect of false-name bids in combinatorial auctions: New fraud in Internet auctions. *Games and Economic Behavior*, 46(1):174–188, 2004.