

入札者の選好を考慮した検索連動型広告オークションの提案

Keyword auction protocol considering preferences of bidders

櫻井 祐子*¹ 横尾 真*²
Yuko Sakurai Makoto Yokoo

*¹日本科学技術振興機構 *²九州大学大学院システム情報科学府
Japan Science and Technology Agency Kyushu University

We propose a new keyword auction protocol considering preferences of bidders. In a keyword auction, advertisers submit her bids to any search keywords and then their advertisements are displayed according the result of the auction when users search the keyword on search engines. In existing protocols, each bidder can only reveal her bidding price to the auctioneer. Thus, we develop a protocol that can deal with exclusive preferences of bidders, i.e., each bidder can declare that she would like to exclusively display her advertisement. Our protocol can adjust the number of slots dynamically based on the bids in order to obtain the optimal social surplus and the payment rule is based on the existing GSP.

1. はじめに

インターネットオークションは、低コストで大規模なオークションを行うことが可能であり、電子商取引の重要な分野となっている。また、人工知能の技術の有望な適用領域として、多数の研究が行われている [Cramton 06, Nisan 07, 横尾 06]。

インターネットオークションでは様々な財の取引が行われているが、近年、検索連動型広告オークションと呼ばれるオークションが注目されている [櫻井 09]。我々が検索エンジンのサイトでキーワードを検索した場合、検索結果の周囲に関連する広告が表示される。このような広告は検索連動型広告と呼ばれ、広告の掲載順位と支払額を決定するためにオークションが適用されている。検索連動型広告オークションでは、広告主は検索キーワードに対して、自分の広告が 1 クリックされたときに支払ってよいと考える価格 (クリック単価) に基づく入札額を申告する。基本的には入札額の高い順に掲載順位が決定され、支払額は第二価格入札を拡張した一般化第二価格入札 (GSP, generalized second price auction) で決定されている。

既存の検索連動型広告オークションでは広告の掲載数が固定されており、最低入札額以上の入札者が掲載数以上存在すれば、その掲載数分の広告は必ず表示される。しかしながら、掲載数が多い場合に比べて掲載数が少ない方が、同じ掲載順位の広告がクリックされる率は高くなるため、入札額に応じて掲載数を変動させた方が社会的に望ましいと考えられる。例えば、1 人の入札者が非常に高い入札を行い、他は低い入札をしたとする。このとき、高い入札額の広告だけを表示した方が、その広告へのクリック率が上昇し、検索エンジンと全ての広告主の効用の和である社会的余剰や主催者の収入が増加する可能性がある。従って、文献 [櫻井 08] では、入札額に応じて掲載数を決定可能なオークションメカニズムとして独占権付き一般化第二価格入札 (GSP-ExR, generalized second price auction with exclusive right auction) の提案が行われている。

GSP-ExR では、入札額に基づいて広告を独占的に表示することを可能にしている。そのため、入札者が自分の広告を他の広告と同時に表示されたくないと考え、高い入札額を申告して

も他の入札額の値によっては独占権を得ることができず、他の広告と同時に表示される可能性がある。たとえば、ブランドイメージを大切にしたい会社は、同時に掲載される広告がどのような会社かを懸念し、自社だけを表示させたいと望むことが考えられる。そこで、本論文では、独占のみか同時掲載かによって異なる入札額を申告することが可能な拡張独占権付き一般化第二価格入札 (Ex-GSP-ExR, Extended GSP-ExR) の提案を行う。さらに、Ex-GSP-ExR では、GSP-ExR では独占か K スロット表示しか選択できなかったが社会的余剰を最適化する任意の k スロットを選択することを可能にした。

本論文では、まず、準備として記法とメカニズムデザインの説明を行い (2 章)、既存の検索連動型広告オークションについて紹介する (3 章)。その後、提案プロトコルについて提案し (4 章)、提案プロトコルの特徴について議論する (5 章)。

2. 準備

2.1 記法

本論文で用いる記法について定義を与える。

まず、最大掲載スロット数を K とする。入札者は 2 種類の入札額を表明することができる。すなわち、独占掲載の場合の入札額と他の広告との同時掲載を許容する場合の入札額である。入札者 i の複数広告同時掲載の場合の 1 クリックに対する評価値を $v_i(K)$ とする。掲載数が 2 以上 K 以下の評価値は同一であるとする。入札額を $b_i(K)$ とする。さらに、入札者 i の独占掲載の場合の 1 クリックに対する評価値を $v_i(1)$ 、入札額を $b_i(1)$ とする。 k スロット表示されるときに上位 i 番目の入札者の支払額を $p_{(i)}(k)$ とする。

次に、主催者が決定するパラメータについて定義する。入札者 i の広告とキーワードとの関連性 (品質) を q_i とする。 k スロット表示される場合、 i 番目に高いスロットがクリックされる確率を $C_{k,i}$ とし、以下の性質を満たすとする。

- $C_{k,i} \geq C_{k,i+1}$: 上位の方がクリック確率が高い
- $C_{k,i} \geq C_{k+1,i}$: 同じ順位では表示スロット数が多い方がクリック確率が低い
- $\sum_{i=1}^{k+1} C_{k+1,i} \geq \sum_{i=1}^k C_{k,i}$: 表示スロットのクリック確率の和は表示スロットが多い方が大きい。

連絡先: 櫻井祐子, 日本科学技術振興機構, 札幌市北区北 14 条西 9 丁目北海道大学情報科学研究科 ERATO 湊離散構造処理系プロジェクト, sakurai@erato.ist.hokudai.ac.jp

k スロット表示されるときに社会的余剰を S_k とする． S_k は以下のように定義される．

$$S_k = \sum_{i=1}^k C_{k,i} q_{(i)} b_{(i)}(K)$$

なお， $k = 1$ のときは $S_1 = C_{1,1} q_{(1)} b_{(1)}(1)$ となる．ここで，上位 i 番目の広告とキーワードとの関連性 (品質) を $q_{(i)}$ とし， $b_{(i)}(K)$ を入札者 i の独占掲載の場合の上位 i 番目の 1 クリックに対する入札額， $b_{(i)}(1)$ を入札者 i の独占掲載の場合の上位 i 番目の 1 クリックに対する入札額とする．

さらに， k^* を社会的余剰を最大化する最適なスロット数とする．

$$S_{k^*} = \max_{1 \leq k \leq K} S_k$$

S_k^{-i} を k スロット表示されるとき， i 番目に高い入札額を除いた社会的余剰とする．

2.2 オークションのメカニズムデザイン

メカニズムデザインとは，複数の利己的なエージェントが意思決定を行う場合に，不正行為の影響を受けない等，何らかの望ましい性質を満たすルールを設計することである．本章では，オークションが理論的に望ましい結果を実現するために必要であると考えられている性質について述べる [Krishna 02, Mas-Colell 95]．本論文では，簡単化のため，エージェントの評価値は個人価値 (private value) とし，他のエージェントの評価値には依存しない．また，エージェントの効用を準線形 (quasi-linear) とする．すなわち， k スロット表示するとき，上位 i 番目の広告を割り当てられた入札者の効用の期待値は

$$u_{(i)}(k) = C_{k,i} (q_{(i)} v_{(i)}(K) - p_{(i)}(k))$$

と算出される．

戦略的操作不可能性：オークションプロトコルが支配戦略 (効用を最大化する戦略) において誘因両立的とは，各エージェントにとって，真の評価値を申告することが支配戦略，すなわち他のエージェントの行動に関わらず最適な戦略となることである．

個人合理性：オークションプロトコルが個人合理的であるとは，支配戦略均衡が存在し，各エージェントが支配戦略を用いた場合に，エージェントはオークションに参加したことにより，参加しない場合と比較して効用が減少することはない．

パレート効率性：パレート効率的な割当てでは，売手と買手を含めた参加者全員の効用の和，すなわち，社会的余剰が最大化される．

3. 既存の検索連動型広告オークション

本章では，GSP-と GSP-ExR の紹介を行う．

3.1 GSP

K スロットの割当てを行うと仮定する．

1. 入札者 i はクリック単価 $b_i(K)$ を入札する．
2. 品質と入札額の積 $q_i b_i(K)$ を降順に並べ替える．

$$q_{(1)} b_{(1)}(K) > q_{(2)} b_{(2)}(K) > \dots > q_{(i)} b_{(i)}(K) > \dots$$

上位 K 番目までの入札者が広告を表示できる．

3. 上位 i 番目の入札者の支払額は，

$$p_{(i)}(K) = \frac{q_{(i+1)} b_{(i+1)}}{q_{(i)}}$$

となる．すなわち，すべての i において $q_{(i)} = 1$ の仮定の下では自分の次に低い入札額を支払うこととなる．

GSP は個人合理性を満たす．また，過大申告をしても無意味である，すなわち，効用が増加しないことが保証されている．

3.2 GSP-ExR

本章では，掲載数を入札額に応じて決定する GSP-ExR を紹介する．GSP-ExR は，表示広告数を社会的余剰に基づいて 1 スロットか K スロットかを決定し，GSP をベースに支払額を決定する．最適な社会的余剰が得られる割当てを実現できるメカニズムとして Vickrey Clarke Groves メカニズム (VCG) が存在する．しかしながら，VCG は支払額の決定方法が複雑であるという課題があるため，実際の適用例がほとんどない．GSP-ExR は，支払額に関して複雑な算出方法を不要とし，GSP ベースで独占権を得る場合はプレミアムを払うというメカニズムである．

メカニズムの詳細は以下の通りである．

1. 入札者 i はクリック単価 b_i を入札する．
2. 品質と入札額の積 $q_i b_i(K)$ を降順に並べ替え，1 スロットと K スロットでの社会的余剰の比較を行い，大きい方を掲載数とする．
3. 支払額は以下の通りとなる．

- 掲載数が K のときは GSP を適用する．
- 掲載数が 1 のときは次のように決定する．

$$p_{(1)}(1) = \frac{1}{C_{1,1} q_{(1)}} (C_{K,1} q_{(2)} b_{(2)} + S_K^{-1}) \quad (1)$$

S_K^{-1} の項が独占権を得るためのプレミアムと解釈することができる．

例 1 最大掲載数が 2，入札者が 2 人の場合を考える．最低入札額 r を 100 とし，各入札者の評価値について $v_1(2) = 300$ ， $v_2(2) = 200$ とする．さらに，広告の品質 q_i を $q_1 = q_2 = 1$ とし，クリック率を掲載数が 1 つの場合は $C_{1,1} = 0.5$ ，掲載数が 2 つの場合は $(C_{2,1}, C_{2,2}) = (0.4, 0.2)$ とする．

このとき，掲載数が 2 となり，入札者 1 に最上位，入札者 2 に 2 番目が割り当てられる．支払額は GSP で決定され，各支払額は $p_{(1)}(2) = 200$ ， $p_{(2)}(2) = 100$ となる．

一方，入札者 1 の入札額が 1,000 の場合，掲載数が 1 となる．入札者 1 の支払額は $(C_{2,1} + C_{2,2}) b_{(2)} / C_{1,1} = (0.4 + 0.2) 200 / 0.5 = 240$ となる．

GSP-ExR は GSP と同じ性質，すなわち，個人合理性を満たし，過大申告をしても効果がないことを保証している．

4. Ex-GSP-ExR

GSP-ExR では，入札額に基づいて独占権を割り当てているが，入札者が自分の広告を他の広告と同時に表示されたくないと考え，高い入札額を申告しても他の入札額の値によっては独占権を得ることができず，他の広告と同時に表示される可能性

がある．そこで，本章では，自分の広告だけを独占的に表示させたいと望む入札者の選好を考慮し，独占広告と複数同時掲載広告の場合に対して異なった入札額を申告することを可能にしたメカニズム (Ex-GSP-ExR) の提案を行う．Ex-GSP-ExR も GSP-ExR と同様に，VCG よりも簡単に支払額を算出し，GSP ベースで支払額を決定する．また，Ex-GSP-ExR は任意のスロット数を扱うことが可能である．

最大 K スロットのオークションでのメカニズムの詳細は以下のとおりである．

1. 入札者 j は $b_j(1)$ と $b_j(K)$ を申告する．このとき，独占権を以外を必要としない場合は $b_j(K) = 0$ となる．
2. 社会的余剰 S_k を最大化するスロット数 k^* を決定する．
3. 支払額は以下のように決定する．

- $k^* = K$ のとき，GSP を適用する．
- $1 < k^* < K$ のとき，

$$p_{(i)}(k^*) = \frac{C_{K,i}b_{(i+1)}(K) + S_K^{-i} - S_{k^*}^{-i}}{C_{k^*,i}}$$

- $k^* = 1$ のとき，

$$\max(b_{(2)}(1), p_{(i)}(1))$$

4. 支払額が負となる，すなわちキャッシュバックが得られることとなる入札者が存在する場合，そのような入札者は落札者から排除する．このとき，排除する入札者数を r としたとき， $k' = k^* - r$ とし， k' スロットにおいて手順 3 を適用し，支払額を決定する．負の支払額を持つ入札者が排除されるまで繰り返す．

$S_K^{-i} - S_{k^*}^{-i}$ の項が GSP に対してプレミアムが加算 / 減算されることとなる．

例 2 最大掲載数が 2，入札者が 2 人の場合を考える．最低入札額 r ，広告の品質 q_i ，クリック率 $C_{k,i}$ は例 1 と同様とする．各入札者の評価値を $(v_1(1), v_1(2)) = (1, 000, 300)$ ， $(v_2(1), v_2(2)) = (200, 200)$ とする．ここで，入札者 2 は独占掲載でも複数掲載でも構わないという選好を示していることになる．

このとき，入札者 1 に独占権を割り当てるのが最適となり，掲載数が 1 となる．入札者 1 の支払額は $\max(200, (C_{2,1} + C_{2,2})b_{(2)}/C_{1,1}) = \max(200, 240) = 240$ となる．

5. Ex-GSP-ExR の特徴

本章では Ex-GSP-ExR の特徴を示す．Ex-GSP-ExR は個人合理性を満たす．一方，手順 4 における例外処理が適用された場合，社会的余剰が最大化される最適な掲載数が選択されない．また，このとき，限定的に過大申告 / 過小申告の効果が生じる．

定理 1 *Ex-GSP-ExR* は個人合理性を満たす．

証明 1 $k^* = K$ が選択される時，GSP は個人合理性を満たすため自明である．

$1 < k^* < K$ が選択される場合を考える．記法の簡単化のため，上位 i 番目の入札者は i とする．

$$\begin{aligned} u_i(k^*) &= C_{k^*,i}(v_i(K) - p_i(k^*)) \\ &= C_{k^*,i}v_i(K) - C_{K,i}b_{i+1}(K) - S_K^{-i} + S_{k^*}^{-i} \\ &\geq S_{k^*} - S_K \geq 0 \end{aligned}$$

となり，個人合理性を満たす． $k^* = 1$ のとき支払額が $b_{(2)}$ となった場合でも個人合理性を満たす．よって，*Ex-GSP-ExR* は個人合理性を満たす．

定理 2 真の評価値を申告したとき，手順 4 が適用されずに k^* が選択されるならば，同じ掲載順位にいる限り，過大申告 / 過小申告をして掲載数を操作しても効用は増加しない．

証明 2 過大申告 / 過小申告をして掲載数を操作した時の掲載数を \tilde{k} とし，効用の比較を行う．

$$\begin{aligned} u_i(\tilde{k}) - u_i(k^*) &= C_{\tilde{k},i}v_i(K) - C_{K,i}b_{i+1}(K) - S_K^{-i} + S_{\tilde{k}}^{-i} \\ &\quad - C_{k^*,i}v_i(K) + C_{K,i}b_{i+1}(K) + S_K^{-i} - S_{k^*}^{-i} \\ &= S_{\tilde{k}} - S_{k^*} < 0 \end{aligned}$$

従って，掲載数を変化させても効用が増加せず，効果がない．

6. おわりに

本論文では，検索連動型広告オークションにおいて，入札者が自分の広告だけを表示させたいという選好を持つ場合を考慮した新しいメカニズムの提案を行った．メカニズムの特徴として，既存の GSP をベースに支払額を決定し，支払額の算出を VCG メカニズムよりも容易に決定できる点がある．

今後の課題として，Ex-GSP-ExR ではキャッシュバックが得られる入札者を表示しないが，このような入札者でも表示できるようにメカニズムの改善を行うことや，入札者の予算制約を制約条件として考慮することなどが挙げられる．

参考文献

- [Cramton 06] Cramton, P., Shoham, Y., and Steinberg, R. eds.: *Combinatorial Auctions*, MIT Press (2006)
- [Krishna 02] Krishna, V.: *Auction Theory*, Academic Press (2002)
- [Mas-Colell 95] Mas-Colell, A., Whinston, M. D., and Green, J. R.: *Microeconomic Theory*, Oxford University Press (1995)
- [Nisan 07] Nisan, N., Roughgarden, T., Tardos, E., and Vazirani, V. V. eds.: *Algorithmic Game Theory*, Cambridge University Press (2007)
- [櫻井 08] 櫻井 祐子，横尾 真，岩崎 敦：適切な掲載数を決定するキーワード広告オークションの提案，コンピュータソフトウェア，Vol. 25, No. 4, pp. 60–67 (2008)
- [櫻井 09] 櫻井 祐子，横尾 真：キーワード広告におけるゲーム理論・オークション理論，人工知能学会誌，Vol. 24, No. 4, pp. 472–480 (2009)
- [横尾 06] 横尾 真：オークション理論の基礎，東京電機大学出版会 (2006)