

掲載数を最適化するキーワード広告オークションの提案

A New Keyword Auction Protocol for Optimizing the Number of Advertisement Slots

櫻井 祐子*¹
Yuko Sakurai

井上 博文*²
Hirofumi Inoue

岩崎 敦*¹
Atsushi Iwasaki

横尾 真*¹
Makoto Yokoo

*¹九州大学大学院システム情報科学府
Graduate School of ISEE, Kyushu University

*²新日鉄ソリューションズ株式会社
NS Solutions Corporation

We propose a new keyword auction protocol for optimizing the number of slots, which is based on Vickrey-Clarke-Groves (VCG) mechanism. In a keyword auction, advertisers submit their bids to search keywords and their ads are displayed according the result of the auction when people search the keyword on internet search engines. In existing keyword auction protocols, the number of slots is determined in advance and the obtained social surplus is not always maximized.

In our protocol, the auctioneer can flexibly determine the optimal number of slots which maximizes social surplus, and the payments are calculated by using the idea of VCG mechanism. We prove our protocol can satisfy strategy-proofness. Also, simulation results show that our protocol can obtain higher social surplus than VCG mechanism with the fixed number of slots.

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一分野となっている。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]。

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、キーワード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 [Aggarwal 06]。Yahoo!や Google などの検索エンジン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。このような広告はキーワード / 検索連動型広告と呼ばれ、キーワード / 検索連動型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。一般に、このようなオークションをキーワード広告オークションと呼ぶ。キーワード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 Vickrey オークションを拡張した方式で決定されている。

既存のキーワード広告オークションでは、広告の最大掲載数が固定されており、必ずしも主催者と全ての広告主の効用の和である社会的余剰が最大化されるとは限らない。そこで、本論文では、入札額に応じて、社会的余剰を最大化する最適な掲載数を決定するオークションプロトコルの提案を行う。掲載数を主催者によって操作可能にした場合、既存のオークションプロトコルの支払方法を適用した場合、入札者は真の評価値を申告することが最適な戦略となることが保証されなくなる。本論文では Vickrey-Clarke-Groves (VCG) メカニズムのアイデアを適用し、主催者が入札額に応じて社会的余剰が最大化する掲載数と支払額を決定する。さらに、提案プロトコルでは入札者は真の評価値を申告することが最適な戦略となること (誘因両立性) を理論的に証明する。また、計算機実験により、広告の掲載数を固定した場合の VCG メカニズムと比較して、提案プロトコルの方がより良い社会的余剰が得られることを示す。

本論文では、まず、オークションのメカニズムデザインについて説明し (2 章)、既存のキーワード広告オークションにつ

て紹介する (3 章)。その後、提案プロトコルについての説明と提案プロトコルが誘因両立性を満たすことを証明し (4 章)、提案メカニズムのシミュレーション結果を示す (5 章)。

2. オークションのメカニズムデザイン

オークションのメカニズムデザインは、ミクロ経済学 / ゲーム理論の主要分野の一つである [梶井 00, Krishna 02]。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 [横尾 06]。

2.1 オークションプロトコルの望ましい性質

オークションプロトコル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 [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。

誘因両立性 (Incentive Compatibility): 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 (dominant-strategy incentive compatible) 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。また、誘因両立性は戦略操作不可能性 (strategy proofness) と呼ばれる。

パレート効率性 (Pareto Efficiency): 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 (social surplus) が最大化される。

個人合理性 (Individual Rationality): 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。

2.2 VCG メカニズム

本節では、理論的に望ましい性質を持つオークションプロトコルについて説明する。

連絡先: 櫻井祐子, 九州大学, sakurai@agent.is.kyushu-u.ac.jp

Vickrey オークション (第 2 価格秘密入札) は単一財を対象としたオークションプロトコルである。Vickrey オークションでは、入札者は入札額を主催者のみに申告し、最高入札額の入札者が落札できる。その支払額は自分の入札額ではなく、2 番目に高い入札額を支払う。Vickrey オークションは誘因両立性を満たす。

Vickrey オークションの一般化として、Vickrey-Clarke-Groves (VCG) メカニズムが存在する。VCG メカニズムは複数の財を対象とした、組合せオークションプロトコルとして適用できる。VCG メカニズムでは、各エージェントは主催者のみに入札額を申告する。割当ては、申告された入札に基づいて全ての入札額の和が最大にあるように割当てられる。財が割り当てられたエージェントの支払額は、そのエージェントが参加することによって生じる、他のエージェントの効用の和の減少分である。すなわち、一種の迷惑料を支払うことになる。このように、VCG メカニズムは他のエージェントの入札額によって支払額が決定され、Vickrey オークションと同様に誘因両立性を満たす。下記に、定式化を示す。

1. 各エージェントは任意の割当て G に対する (必ずしも真とは限らない) 評価関数 $v_i(G)$ を主催者に申告する。
2. 主催者はエージェントが申告した入札額の総和を最大化する最適な割当て G^* を決める。
3. エージェント i の支払額 p_i は以下で定義される。

$$p_i = \sum_{l \neq i} v_l(G_{\sim i}^*) - \sum_{l \neq i} v_l(G^*)$$

ここで、 $G_{\sim i}^*$ はエージェント i が入札しなかった場合の他のエージェントが申告した入札額の総和を最大化する割当てである。

3. 既存のキーワード広告オークション

Yahoo! と Google で行われているキーワード広告オークションがよく知られているが、これら 2 つのオークションで適用されているプロトコルは異なる。以下、それぞれのプロトコルについて紹介する。

3.1 スポンサーサーチ

Yahoo! では Overture 社のスポンサーサーチが適用されている。スポンサーサーチでは、主催者は事前に掲載数と最低入札額を決定する。最低入札額を設定することで、支払額は最低入札額以上になる。広告主はクリック単価に基づく入札額 (必ずしも真の評価値ではない) を主催者に申告する。主催者は入札額を高い入札額から降順に並べ替える。すなわち、 $b_{(j)}$ を j 番目に高い入札額とすると、

$$b_{(1)} > b_{(2)} > \dots > b_{(j)} > b_{(j+1)} > \dots$$

となる。このとき、 $b_{(j)}$ を申告したエージェント i の支払額は、次に低い入札額 $b_{(j+1)}$ となる。すなわち、

$$p_{i,j} = b_{(j+1)}$$

を、自分の広告がクリックされる毎に支払う。

例 1 掲載数が 2 つ、最低入札額が 100 円のスポンサーサーチに 2 人のエージェントが入札を行うとする。エージェント 1 の入札額を 200 円、エージェント 2 の入札額を 150 円とする。

このとき、エージェント 1 が上位のスロットを得て、1 クリック毎に 150 円を支払う。エージェント 2 が下位のスロットを得て、最低入札額の 100 円を 1 クリック毎に支払う。

3.2 Google AdWords

Google AdWords は Google で行われているキーワード広告オークションである。Google AdWords では品質スコア (Quality Score) を導入している点がスポンサーサーチと異なる。品質スコアは、キーワードのクリック率 (Click-Through-Rate, CTR)、広告テキストの関連性、キーワードの関連性、リンク先ページの関連性に基づき、Google が決定する。掲載順位は入札額 \times 品質スコアの低い順に決定される。すなわち、入札額が高くても品質スコアが低ければ、上位に掲載されない場合がある。

Google AdWords においても、最低入札額が設定されており、最低入札額以上のエージェントが掲載できる権利を得る。入札額 \times 品質スコアの低い値から降順に並べ替える。 $b_{(j)}$ を j 番目に高い値とすると、

$$b_{(1)} > b_{(2)} > \dots > b_{(j)} > b_{(j+1)} > \dots$$

となる。このとき、 $b_{(j)}$ のエージェント i は、品質スコアを $C_{(j)}$ としたとき、

$$p_{i,j} = \frac{b_{(j+1)}}{C_{(j)}} + 1$$

を広告が 1 クリックされる毎に支払う。

例 2 例 1 と同様に、掲載数が 2 つ、最低入札額が 100 円の Google AdWords に 2 人のエージェントが入札を行うとする。エージェント 1 の入札額を 200 円、エージェント 2 の入札額を 150 円とする。品質スコアについて、エージェント 1 が 10%、エージェント 2 が 20% とする。

このとき、エージェント 1 は $0.1 \times 200 = 20$ 、エージェント 2 は $0.2 \times 150 = 30$ となる。従って、エージェント 2 が上位に掲載され、 $\frac{20}{0.2} + 1 = 101$ 円を支払う。エージェント 1 は下位に掲載され、100 円を支払う。

4. 新しいキーワード広告オークションプロトコルの提案

既存のキーワード広告オークションプロトコルは、事前に掲載数が決定されているため、社会的余剰を必ずしも最大化しない場合が存在する。また、入札額に応じて社会的余剰を最大化する掲載数を決定し、支払方法として 3 章で説明した Google AdWords を適用した場合、真の評価値を入札しない方が効用が増加する場合があり、誘因両立性を満たさない。そこで、社会的余剰を最大化する最適な掲載数を決定し、誘因両立的なキーワード広告オークションプロトコルの提案を行う。

4.1 提案プロトコル

本提案プロトコルは次の通りである。最大掲載数 K の広告スロットを対象としたオークションを行い、エージェント $i \in I$ が入札を行うとする。エージェント i のクリック単価の評価値を v_i とし、その場合の入札額を b_i とする。品質スコアについて、本論文では単純化のため、掲載順位のみ依存すると仮定する。掲載数が k のときのスロット j (j 番目の掲載順位のスロット) への品質スコアを $C_{k,j}$ ($j \leq k$) とする。このとき、 $C_{k,j}$ は下記の条件を満たすと仮定する。

- $C_{k,j} \geq C_{k+1,j} \quad \forall k, \forall j$
- $C_{k,j} > C_{k,j+1} \quad \forall k, \forall j$
- $\sum_{j=1}^k C_{k,j} < \sum_{j=1}^{k+1} C_{k+1,j} \quad \forall k$

割当ては下記の通りに決定する。まず、 $x_{k,j}^i$ は掲載数が k のときのエージェント i へのスロット j に関する割当てを示すとする。すなわち、 $x_{k,j}^i = 1$ は、掲載数が k のとき、エージェント i にスロット j が割り当てられていることを意味する。一方、 $x_{k,j}^i = 0$ は、掲載数が k のとき、エージェント i にスロット j が割り当てられていないことを示す。このとき、掲載数 k のときの最大社会的余剰 S_k は次式で得られる。

$$S_k = \max_{i,j} \sum_{1 \leq j \leq k} \sum_{i \in I} C_{k,j} b_i x_{k,j}^i$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in I} x_{k,j}^i \leq 1$$

$$\sum_{1 \leq j \leq k} x_{k,j}^i \leq 1$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{1 \leq j \leq k} x_{k,j}^i = k \leq K$$

全ての S_k において最大値となる k^* が最適な掲載数となり、割当てが決定される。

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

支払額は VCG メカニズムを用いて決定する。スロット j を割り当てられたエージェント i の支払額は

$$p_{i,j} = \frac{1}{C_{k^*,j}} \{S_{k^*}^{-i} - (S_{k^*} - C_{k^*,j} b_i)\}$$

となる。ここで、 $S_{k^*}^{-i}$ はエージェント i が存在しない場合の最大社会的余剰とし、次のように定義する。

$$S_{k^*}^{-i} = \max_{i,j} \sum_{1 \leq j \leq k} \sum_{i \in I \setminus i} C_{k,j} b_i x_{k,j}^i$$

以下、支払額の決定方法に Google AdWords を適用した場合、真の評価値を入札しない場合として、真の評価値よりも高く入札する (over-bidding) の効果がある例を示し、次に、本プロトコルの例を示す。

例 3 例 2 と同様に、掲載数が 2 つ、最低入札額が 100 円のキーワード広告オークションに 2 人のエージェントが入札を行うとする。掲載数が 1 つの場合、品質スコアを $C_{1,1} = 20\%$ 、2 つの場合の 1 番目のスロットの品質スコアを $C_{2,1} = 15\%$ 、2 番目のスロットの品質スコアを $C_{2,2} = 6\%$ と仮定する。エージェント 1 の入札額を 200 円、エージェント 2 の入札額を 150 円とする。

このとき、掲載数ごとの最大社会的余剰は

- $S_1 = 0.2 \times 200 = 40$
- $S_2 = 0.15 \times 200 + 0.06 \times 150 = 39$

となる。従って、 $k^* = 1$ となり、エージェント 1 にスロットが割り当てられ、1 クリックあたりの支払額は 151 円となる。一方、エージェント 2 が入札額を 180 円とした場合、

- $S_2 = 0.15 \times 200 + 0.06 \times 180 = 40.8$

となり、エージェント 2 に支払額 100 円でスロットが割り当てられることとなり、over-bidding の効果がある。

例 4 2 人のエージェントがキーワード広告オークションに参加しているとする。広告の最大掲載数 $K = 2$ とする。掲載数が 1 つの場合、品質スコアを $C_{1,1} = 20\%$ 、2 つの場合の 1 番目のスロットの品質スコアを $C_{2,1} = 13\%$ 、2 番目のスロットの品質スコアを $C_{2,2} = 10\%$ と仮定する。

このとき、エージェント 1 の広告 1 クリックに対する評価値を 200 円、エージェント 2 の評価値を 100 円とする。

入札者が真の評価値を入札すると仮定すると、掲載数ごとの最大社会的余剰は

- $S_1 = 0.2 \times 200 = 40$
- $S_2 = 0.13 \times 200 + 0.1 \times 100 = 36$

となる。従って、 $k^* = 1$ となり、エージェント 1 にスロットが割り当てられ、1 クリックあたりの支払額は 100 円となる。

4.2 誘因両立性

本節では、提案プロトコルが誘因両立性を満たすことを示す。すなわち、Google Adwords では、例 3 のように真の評価値を入札しない方が効用が増加する場合が存在するが、本提案プロトコルはでそのような問題が生じないことを保証する。

定理 1 提案プロトコルは誘因両立性を満たす。

証明 1 評価値 v_i をもつ入札者が正直に入札をする場合の、最適な掲載数を k^* 、割り当てられるスロット j に対する品質スコアは $C_{k^*,j}$ で与えられるとする。一方、自分以外に入札 $\{\hat{v}_j\}_{j \neq i}$ と仮定し、エージェント i の入札を \hat{v}_i とする。このときの最適な掲載数を \hat{k} とし、エージェント i がスロット \hat{j} を獲得したときの支払額 $p_{i,\hat{j}}$ とする。入札者 i の効用は

$$\begin{aligned} C_{\hat{k},\hat{j}}(v_i - p_{i,\hat{j}}) &= C_{\hat{k},\hat{j}}v_i - \{S_{\hat{k}}^{-i} - (S_{\hat{k}} - C_{\hat{k},\hat{j}}\hat{v}_i)\} \\ &= C_{\hat{k},\hat{j}}v_i + S_{\hat{k}} - C_{\hat{k},\hat{j}}\hat{v}_i - S_{\hat{k}}^{-i} \\ &\leq \max_{k,j} \{C_{k,j}v_i + S_k - C_{k,j}\hat{v}_i\} - S_{\hat{k}}^{-i} \\ &= C_{k^*,j}v_i - \{S_{k^*}^{-i} - (S_{k^*} - C_{k^*,j}v_i)\} \\ &= C_{k^*,j}(v_i - p_{i,j}). \end{aligned}$$

となる。すなわち、エージェント i は v_i を入札することによって効用を最大化することができることとなり、真の評価値を入札することが最適な戦略となる。従って、誘因両立性が満たされる。

5. 評価実験

提案プロトコルとスロット数を固定した VCG メカニズムとの社会的余剰と主催者の余剰 (支払額の合計) に関する評価実験結果を示す。

5.1 問題設定

まず、本実験では最大掲載数 K を 10 と設定する。

品質スコアは、文献 [Brooks 04] に示されている Google Adwords の Relative CTR の実数値に基づいてモデル化したものを適用した。Relative CTR とは、最上位の CTR を 100% としたときの他の掲載順位の CTR の比率を意味し、文献 [Brooks 04] によれば掲載順位が下がる毎に約 20% 程度減少している。本実験では、各掲載数における最上位の品質スコアについて、掲載数が 10 のときの最上位の品質スコアを 1 と

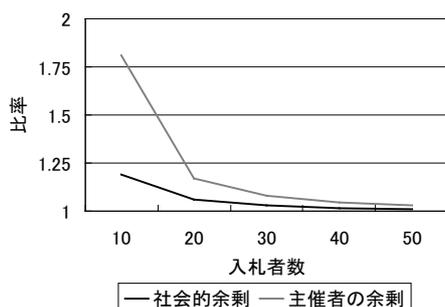


図 1: 入札額が一様分布の場合

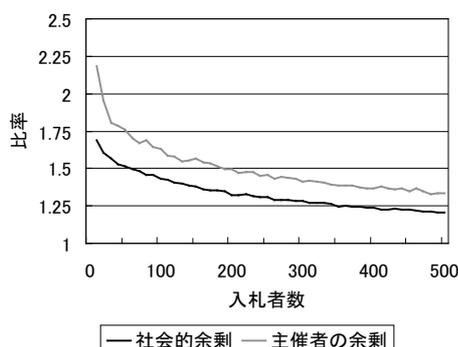


図 2: 入札額がべき乗分布の場合

して、他の掲載数の最上位の品質スコアは次式で与えられると仮定する。

$$C_{k,1} = C_{k+1,1} + \frac{C_{k+1,1} * \alpha^k}{1 + \alpha + \alpha^2 + \dots + \alpha^k}$$

また、掲載数 k のときの j 番目の掲載順位のスロットにおける品質スコアは、

$$C_{k,j} = C_{k,1} * \alpha^{j-1}$$

と仮定する。本実験では $\alpha = 0.775$ とした。

入札額は下記の 2 つについて設定する。

一様分布 [1,100] からランダムに決定する。

べき乗分布 [1,100] からべき乗分布を用いて決定する。具体的には、 $y = 100x^{-r}$ において $r = 1.22$ とし、評価値 x を決定する。 y は x 以上の値をとりうる確率をあらわす。この分布は、低い評価値を持つエージェントが複数存在する一方で、高い評価値を持つエージェントが少数存在することを意味する。

エージェント数は、一様分布の場合は [10,50] の範囲で、べき乗分布の場合は [10,500] の範囲で実験を行う。

5.2 評価実験の結果に対する考察

上記の設定方法を用いて 1,000 個の問題インスタンスを作成し、提案プロトコルで得られる社会的余剰と主催者の余剰について、掲載数を 10 に固定した場合の VCG メカニズムで得られる結果との比率の平均値を図 1 と図 2 に示す。

一様分布 エージェント数が 10 人の場合、提案プロトコルの方が明らかに良い結果が得られているが、20 人以降では提案プロトコルにおいても掲載数を 10 にすることが最適となる場合が増加するため、比率は 1 に近づいていく。

べき乗分布 提案プロトコルで得られる結果は一様分布の場合よりも高い。べき乗分布の場合、入札額の低いエージェントが多いため、エージェント数が少ない場合、掲載数を減らした方が社会的余剰が大きくなる傾向があることが考えられる。一方で、入札者数が多くなれば、入札額が高いエージェントの数が増えるため、提案メカニズムにおいても最適な掲載数が 10 となる場合が増加する。

6. おわりに

本論文では、近年、注目されているキーワード広告オークションを対象とし、入札額に応じて掲載数を最適化するオークションプロトコルの提案を行った。さらに、提案プロトコルでは、真の評価値を申告することが支配戦略であることを理論的に証明し、掲載数を固定した場合の VCG メカニズムと比較して、社会的余剰と主催者の余剰が高いことを計算機実験により示した。

本プロトコルは VCG メカニズムに基づいているが、支払額の決定方法を全ての参加者に直感的に理解され難いと考えられる。そこで、今後の課題には、より実用的なプロトコルとして、VCG メカニズムと比較して近似的な結果を達成し、よりわかりやすいキーワード広告オークションプロトコルの提案することが挙げられる。

参考文献

- [Aggarwal 06] Aggarwal, G., Goel, A., and Motwani, R.: Truthful auctions for pricing search keywords, in *Proceedings of the 7th ACM conference on Electronic commerce (EC'06)*, pp. 1-7 (2006)
- [梶井 00] 梶井 厚志, 松井 彰彦: ミクロ経済学: 戦略的アプローチ, 日本評論社 (2000)
- [Brooks 04] Brooks, N.: The Atlas Rank Report: How Search Engine Rank Impacts Traffic, Technical Report (2004)
- [Cramton 06] Cramton, P., Shoham, Y., and Steinberg, R. eds.: *Combinatorial Auctions*, MIT Press (2006)
- [Krishna 02] Krishna, V.: *Auction Theory*, Academic Press (2002)
- [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)
- [Mas-Colell 95] Mas-Colell, A., Whinston, M. D., and Green, J. R.: *Microeconomic Theory*, Oxford University Press (1995)