

Web サービスのオークション

松原 繁夫

京都大学大学院 情報学研究科 社会情報学専攻

本論文では、Web サービス合成の問題を解くオークション方式を提案する。Web サービス合成は、利用者の要求を満たすように適切な web サービスを組み合わせる問題である。Web サービス提供者がサービスを有償で提供しようとした場合、利用者にとっての価値はどのように組み合わせられるかによって決まるため、適切な価格に設定することは容易ではない。この問題の解決にはオークションが有望である。しかし、Web サービスの想定する世界の動的性質がオークション適用への障害となる。すなわち、大きな不確実性を持った費用や評価値の上では、勝者や支払額を適切に決定できないかもしれない。ここで、割当て決定の間に情報収集操作を行えば、不確実性を低減できる可能性がある。しかし、情報収集操作自体にも費用が発生する。すなわち、情報収集を行い、不確実性を低減させることで得られる効用の増加と、情報収集に伴う費用の増加というトレードオフの関係が存在する。そこで、本論文では、適切な情報収集の水準を決定できるオークション方式を提案する。また、本方式が誘因両立性を満たすことを示す。

Auctioning Web Services

Shigeo Matsubara

Dept. of Social Informatics, Kyoto University

We have developed an auction mechanism for solving Web service composition problems. A Web service composition problem is a problem to find a combination of Web services that attains a user's task. When service providers impose a payment on a user, finding an appropriate price is difficult because the user's valuation of a service depends on how it is combined to other services. To solve this problem, employing auction mechanisms is promising. However, Web services are used in a highly dynamic environment, which prevent auction mechanisms from performing well. If the calculation is done based on the uncertain valuation values/costs, it may fail to determine appropriate winners and the amount of payments. Information gathering during the process of the problems solving may mitigate this problem. However, information gathering itself may incur some cost. That is, a trade-off relation exists between increasing a utility by using more accurate values and increasing the cost of information gathering. To solve this problem, we propose an auction mechanism that find an appropriate level of information gathering. We prove that the proposed mechanism satisfies incentive compatibility.

1 はじめに

Web サービスとは、部品化されたネットワーク上のソフトウェアを、WWW の技術を用いて応用プログラムとして結合する技術である。一旦、Web サービスとして実装すれば、様々な応用プログラムから利用できるという利点がある。Web サービスの一つの課題はサービス合成法の開発である。これは、利用者が持つタスクを実現するために、どのように

個々の Web サービスを組み合わせるかという問題であり、これまでにプランニング技術を応用したものの [7] や、制約充足問題として定式化したもの [2] などが提案されている。従来研究で経済的側面に焦点を当てたものはまだ多くないが、今後 Web サービスが商業的な場で利用されることが増えれば、様々な問題を生じさせることになる。

サービス提供者にとって、サービスの価格を適切

に決定することは容易ではない。Web サービスは、利用者がその目的に合わせて様々に組み合わせられるところに特徴があり、個々のサービス提供者にとって、どのようなワークフローの中で自己のサービスが呼び出されるかを事前にすべて知ることは難しい。仮にあらかじめ個々のサービス単価を設定しておき、それを単純に足し合わせた金額を利用者に課金することを考えよう。このとき、価格設定が高すぎれば、利用者には選択されなくなるであろう。一方、価格設定が低すぎれば、利用者がより高額を支払い意思がある状況でも、低い収入しか得られないことになり、より良いサービスを提供しようとする意欲が削がれるかもしれない。この問題を解決するには、利用者がサービスに持つ価値に応じて、動的に価格を決定することが必要である。

本稿では、このような状況に対処するために、オークションの利用を考える。Web サービス合成においては、まず利用者がタスクを公示し、つぎに各サブタスクに対してサービス提供者が費用を入札し、その上である基準のもとにサービスの選択と支払額の決定を行うことになる。これに類似した状況はオークションによる組み合わせ調達として扱われている[8]。そこでは、売手が高品質なものを提供しようとするれば費用が高くなり、低品質なものであれば、費用は低くなるといった関係が財にあり、複数の売手が存在する状況で、買手が購入先、および、品質と価格を決定する問題である。

このようにオークションは様々な分野への適用が検討されているが、Web サービスの選択にオークション手法を適用する上で問題となるのは、それが対象とする世界がより動的であるという点である。例えば、航空券予約の場合など考えても、利用可能な座席は時々刻々変化していき、希望する条件の座席が確保できるかといったことは確率的である。また、あるサービスの入力、別の先行するサービスの出力となっているような場合がある。例えば、宿泊サービスが、航空券予約サービスの出力の一部である到着日時を入力としている場合などである。このような場合、不確実性の連鎖が生じ、不確実性の度合いが増すことになる。

不確実な状況に対処するには、情報収集操作を行い、不確実性を低下させることが効果的である。例えば、日本からボストンに旅行する場合、NW、UA

など複数の航空会社が存在する。ここで、仮に旅行者がUAよりNWを選好するとしても、直ちにNWで予約すればよいとは限らない。もしNWにビジネスクラスにしか空席がなければ、UAのエコノミー席の方がこの旅行者の制約を満たすかもしれない。つまり、NWとUAの空席情報を確認してから、どちらの航空会社に予約を入れるかを決める方がよい場合が存在する。情報収集操作という点では、例えば、プランニング研究においても、センシング行為の取り扱いが議論されている[1]。

さて、経済性という観点で情報収集操作を見たときに問題となるのは、情報収集操作自体に費用が発生するという点である。情報収集操作が費用0で行えるのであれば、得られる限りの情報をすべて集めれば、より適切な意思決定が行える。しかし、Web サービスの世界では、あるサブタスクに対して多数のサービス提供者が存在する場合があり、網羅的な情報収集を行うことは、かえって全体の効用を減少させるかもしれない。つまり、より正確な情報の元で意思決定を行うことによる効用の増分が、情報収集操作による費用の増分を越えない範囲で情報収集操作を行わねばならない。さらに言えば、この情報収集操作には複数のエージェントが関係するため、虚偽申告によってサービス提供者が結果を操作しようとするかもしれない。このような戦略的操作を抑制できるかといったインセンティブに関する検討が必要である。

本稿では、上記の問題に対して、適切な水準の情報収集操作を行い、サービスの選択と支払額の決定を行うオークション方式を提案する。提案方式では、サービス提供者は各々が持つ情報を真実申告することが最善となる。あいまいな情報を扱うという点では、専門家と素人といった財の情報に関する入札者間の非対称性を扱った研究[3]や、財の評価値が外部事象に条件づけられている場合を扱った研究[5]などがあるが、本稿で扱っている問題とは構造が異なる。

以下、2章では、形式的なモデルを提示し、3章では、オークションプロトコルを提案する。つぎに、4章で提案プロトコルの性質を議論し、5章で実用化に向けた課題を議論し、6章を結びとする。

2 モデル

本章では厳密な議論を可能とするため形式的なモデルを提示する。取引の場には、一人のサービス利用者と複数のサービス提供者が存在する。ここでは、前者を買手と呼び、後者を入札者 *bidder* i ($i = 1, \dots, n$) と呼ぶ。買手は本稿では、オークション主催者と同一視できる。買手は自己のタスクを実現するために複数のサービス $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ を購入する。組み合わせられたサービスを複合サービスと呼ぶ。

タスクはワークフローに従ってサブタスク $\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ に分割され、各サブタスクを実行できる Web サービスが検索され、選択された Web サービスが呼び出されることでサブタスクが実行される。本稿では、このサービスが検索された段階で、Web サービス提供者が費用を含めた自己の利用条件を入力し、それに基づいて買手が各サブタスクの割当てを決定するとする。なお、多くのサービス合成の研究では、タスクを実現するためのサブタスクの組み合わせ方自体を求めようとしているが、本稿では、サブタスクへの分割法を規定した抽象ワークフローがあらかじめ与えられているとする。その上で、社会的余剰が最大となる具体サービスの組み合わせを見つけることを課題とする。なお、同じタスクを実現するのに異なる複数の抽象ワークフローが存在するかもしれない。本稿で提案する方法では、そのような場合も同様に取り扱うことが可能である。

つぎに、個々のサービスについて考える。サービスの出力には複数の可能性があり、それらは品質、費用と実行可能確率によって規定される。例えば、航空券予約サービスを考えれば、直行便か乗り継ぎ便かといった可能性があり、それに付随して品質と費用が変化するであろう。また、情報収集前には、座席が実際に確保可能かどうかわからない。よって、座席が確保可能な程度を確率として表す。Web サービス s_i の出力は、 $\{out_i^1, out_i^2, \dots, out_i^k\}$ という可能性があり、各々に対して品質 $q(out_i^j)$ 、費用 $c(out_i^j)$ 、実行可能確率 $p(out_i^j)$ が与えられるとする。

この不確実性に関しては、情報収集操作を行うことで、不確実性の低減を図れることがある。航空券予約サービスにおいては、利用者の希望する日程の航空便に空席があるかデータベースを検索するこ

とで、座席が実際に確保可能かどうかを知ることができる。つまり、この場合は、情報収集操作を行うことで、実行可能確率が 0、あるいは、1 と判明する。なお、情報収集操作を行ったからといって、実行可能確率が必ず 0 か 1 になるとは限らない。例えば、データマイニングの計算タスクなどは、前処理によって計算時間の予測精度は向上するものの、問題を解き終わるまでは正確に計算時間を知ることができない。

個々のサービスが組み合わせられて複合サービスが構成されるが、個々のサービスに関する品質、費用、実行可能確率は、他のサービス提供者が持つ値とは独立であると仮定する。すなわち、本稿では、価値モデルとして、個人価値モデルのオークションを扱っている。

入札者 *bidder* i の効用 $u_i()$ は、準線形効用の仮定をおき、支払額 $payment_i$ と費用 $c(out_i^j)$ の差で表されるとする。買手の効用 $u_0()$ は、複合サービス S に対する評価値 $v(S)$ と支払額 $\sum payment_i$ の差で表す。

さて、本稿では、社会的余剰を最大化する、すなわち、買手と入札者の効用の総和を最大化する割当てを見つけることを目標とする。社会的余剰は $v(S) - \sum_i c(out_i^j)$ で表される。ここで、固定した割当てだけではなく、情報収集の結果と、先行するサブタスクの出力に応じて、割当てを適切に変更する必要がある。これを行なうために、本稿では [5] で提案された、割当計画を導入する。本稿においては、割当計画は、初期割当てと、情報収集操作と先行サブタスクの出力が判明したときに、割当てをどう変更するかを規定した遷移規則の集合から構成される。

図 1 に割当計画の例を示す。これは航空券予約 t_1 と宿泊予約 t_2 に関して、 $(t_1, t_2) = (bidder 1, bidder 2)$ が初期割当てであることと、*bidder* 3 による情報収集操作の結果、*bidder* 3 が安価な座席を提供可能であれば、航空券予約を *bidder* 3 に依頼することとし、安価な座席が提供可能でなければ、航空券予約をそのまま *bidder* 1 に依頼することを示している。

先に効用について述べたが、割当計画の元では、効用は割当計画に対して計算され、遷移経路に応じて足し合わされることになる。割当計画を AP とし

初期割当て: $(t_1, t_2) = (\text{bidder } 1, \text{bidder } 2)$

最終割当て:

$(t_1, t_2) = (\text{bidder } 3, \text{bidder } 2)$ if 安価な座席あり

$(t_1, t_2) = (\text{bidder } 1, \text{bidder } 2)$ if 安価な座席なし

図 1: 割当計画の例

て、入札者の効用は以下で与えられる。

$$u_i() = \text{payment}_i(AP) - \text{cost}_i(AP)$$

3 オークションプロトコル

本章では、適切に情報収集操作を行って割当てを決定するための新たなプロトコルを提案する。最初に、オークションプロトコルに望まれる性質を述べ、つぎに個別の情報収集操作を行うかどうかの判断基準を示し、その後、提案プロトコルを提示する。

3.1 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に望まれる性質は個人合理性、パレート効率性である。個人合理性とは、入札者は、合理的な行動を取るならば、オークションに参加することで損をすることはないことを意味する。パレート効率性は、他の入札者の効用を減じることなくある入札者の効用を増加させることができないことを意味する。オークションにおいて、パレート効率性が満たされるならば、社会的余剰、すなわち、買手と入札者の効用の総和は最大化される。なおこれは、買手と入札者の間で貨幣の交換が可能という仮定と準線形効用の仮定に依っている。

プロトコルの設計にあたり、我々は誘因両立性の制約を課す。各入札者が受けるタスクの割当てやタスク実行に対する支払額はその申告値により変化する。ここで、誘因両立性とは、他の入札者がどのような申告を行っても、各入札者にとって真実申告が自己の効用を最大化する、すなわち、最善の戦略となることを意味する。顕示原理によって、誘因両立性の仮定をおいても議論の一般性は失われないことが保証されている [4]。この制約を課すことで、プロトコルの探索空間の削減が可能となる。加えて、

この制約が成立すれば入札者は他の入札者の費用を偵察する必要がなくなる。これはシステムの安定化に結び付き、他の入札者の費用を推定するコードが不要になるという点で、エージェントプログラムの実装も容易になる。

3.2 情報収集操作の価値

本節では、個々の情報収集操作を行うか行わないかの基本となる判断法を示す。複数の情報収集操作が可能の場合の扱いについては 3.3 節で述べる。ここでの判断法は単純であり、情報収集操作を行うことで、社会的余剰の期待値が増加するならば、情報収集操作を行い、増加しないならば、情報収集操作を行わない。以下に例を用いて考える。

例 1 同じ機能を提供するサービスが *bidder* 1 と *bidder* 3 により提供されているとする。*bidder* 1 は費用 3 でサービスを提供できる。*bidder* 3 は費用 10 でサービスを提供できるが、確率 0.5 で費用 1 でサービスを提供できるとする。また、*bidder* 3 自身が自己の提供するサービスに関して情報収集操作を行えば、費用 1 でサービスを提供できるかどうか明らかになるが、費用 0.5 が発生するとする。まず、情報収集操作を行わない場合を考える。*bidder* 1 の費用の期待値は 3、*bidder* 3 の費用の期待値は $0.5 \times 1 + 0.5 \times 10 + 0.5 = 6$ となるため、費用が小さい *bidder* 1 にサービス提供を依頼することになる。一方、情報収集操作を行う場合を考える。ここでは、*bidder* 3 が費用 1 で提供できることが判明した場合、*bidder* 3 に依頼し、そうでない場合は *bidder* 1 に依頼することにする。この場合、費用の期待値は、 $0.5 \times 1 + 0.5 \times 3 + 0.5 = 2.5$ となる。これは、情報収集操作を行わない場合の費用 3 より小さい。よって、この場合、*bidder* 3 に情報収集操作を行うように指示がされる。

例 2 例 1 において、*bidder* 3 による情報収集操作の費用が 0.5 ではなく、1.5 であったとしよう。*bidder* 3 が費用 1 で提供できることが判明した場合、*bidder* 3 に依頼し、そうでない場合は *bidder* 1 に依頼することは変わらない。この場合、費情報収集操作を行った場合の費用の期待値は、 $0.5 \times 1 + 0.5 \times 3 + 1.5 = 3.5$ となる。先の例とは異なり、情報収集操作を行わな

い場合よりも費用の期待値が増加するので、この場合は情報収集操作を行わないことになる。

以上の例で見たように、情報収集操作を適切に行うことで社会的余剰を増加させることが可能である。

3.3 複数の情報収集操作の適用順序

情報収集操作を行うことで、各サブタスクを一人の入札者に割当ててのではなく、情報収集操作の結果に応じて複数の入札者の中から割当て先を選ぶことが可能となっている。これが費用を削減できる理由である。しかし、各サブタスクを条件に応じて複数の入札者に割当てるということは、タスクの割当て方に関する探索空間が非常に拡大されることになる。よって、複数の情報収集操作が可能な場合、何からの効率的な扱い方を考案することが必要となる。

ここでは、あるサブタスクに関して、それを達成できるサービスが複数存在し、それに付随して複数の情報収集操作が可能な場合を考える。ここでは、どの操作を実行するのか、またその実行順序を決定する必要がある。本稿では、議論を簡単にするため、同様な機能を持つ複数のサービスによって実現される品質は同一であるとし、その費用が異なるとする。ある時点で得られているサービスの期待費用が C_t であるとして、さらに別の情報収集操作を実行する場合を考える。ここでは、簡単のため、情報収集操作の対象となる Web サービス s_i の出力として 2 つの可能性があり、費用が c_i^1, c_i^2 で表されるとする。 $c_i^1 < c_i^2$ を仮定する。当然、買手は低い費用 c_i^1 を選択する。前者が実現する確率を p_i 、後者が実現する確率を $1 - p_i$ で表す。情報収集操作を行うことで、どちらが実現するかを確実に知ることができるとする。また、この情報収集操作を行うには、費用 c_i^0 が必要であるとする。

このとき、情報収集操作によって、タスク依頼先を変更する必要が生じるのは、 $c_i^1 < C_t < c_i^2$ が成り立つ場合である。 $C_t < c_i^1$ であれば、サービス s_i に切り替える必要はない。また、 $C_t > c_i^2$ であれば、つねに s_i を用いればよい。よって、情報収集操作を行い、費用 c_i^1 で提供できることがわかれば、サービス s_i を利用し、費用 c_i^1 で提供できない場合は、サービスを変更しないとすれば良い。このとき、費

用の期待値は以下で表される。

$$p_i c_i^1 + (1 - p_i) C_t + c_i^0 \quad (1)$$

よって、一度だけ付加的に情報収集操作を行う場合、期待費用が最小となる、すなわち、式 1 が最小となるサービス s_i を選択すれば良い。

つぎに、さらにサービス s_j に対する情報収集操作を行うことを考える。ここでは、二つの場合に分けて考える。 s_i と同じく、費用が c_j^1, c_j^2 で表され、 $c_j^1 < c_j^2$ が成り立つとする。前者が実現する確率を p_j 、後者が実現する確率を $1 - p_j$ で表す。情報収集操作を行うことで、どちらが実現するかを確実に知ることができるとする。また、この情報収集操作を行うには、費用 c_j^0 が必要であるとする。

まず、 $c_i^1 \leq c_j^1$ の場合を考える。このとき、まず s_i に関する情報収集操作を行い、つぎに、 s_j に関する情報収集操作を行うことになる。なぜなら、 s_i に関する情報収集操作を行い、費用 c_i^1 でサービス提供できることが判明すれば、それが最小費用であるため、サービス s_j に関して情報収集する必要がなくなり、全体としての費用を削減できるからである。このときの費用の期待値は以下で表される。

$$p_i c_i^1 + (1 - p_i)(p_j c_j^1 + (1 - p_j) C_t + c_j^0) + c_i^0 \quad (2)$$

s_j として選択されるべきものは、サブタスクを達成可能なサービスの中で、 s_i を除いて、 $p_j c_j^1 + (1 - p_j) C_t + c_j^0$ が最小となるものである。

つぎに、 $c_i^1 > c_j^1$ の場合を考える。このとき、費用の期待値は以下で表される。

$$p_j c_j^1 + (1 - p_j)(p_i c_i^1 + (1 - p_i) C_t + c_i^0) + c_j^0 \quad (3)$$

s_j として選択されるべきものは、この式 3 を最小とする s_j である。

この 2 つの場合に関して得られる費用の期待値を比較して、より費用が小さくなる方を 2 回の情報収集操作を行う場合の情報収集操作と適用順序とする。3 回以上の情報収集操作を行う場合は、同様の操作を繰り返す。付加的な情報収集操作を行っても費用の期待値が減少しない場合は、そこで探索を打ち切る。

3.4 タスク割当てオークションプロトコル

情報収集操作を行いながらサービス提供者の選択を行なうオークションプロトコルを提案する。支払額の計算法は Vickrey-Clarke-Groves (VCG) プロトコルに基づいているが、メッセージ空間の拡張と割当計画の構成法は新規なものである。ここで、メッセージ空間とは、買手と入札者の中でやり取りされる情報の種類を指す。

オークションプロトコルの概要を以下に示す。

1. 買手はワークフローに含まれる各サブタスクについて、それを実行できる Web サービスを検索し、サービス提供者にサービス提供条件の入札を依頼する。
2. サービス提供条件の入札を依頼された入札者は、出力として想定される品質、費用、実行可能確率の組を買手に申告する。また、情報収集操作が可能な場合は、それによって、実行可能確率がどう変化するかという情報とそれに要する費用を買手に申告する。これらの値は真値であるかもしれないし、虚偽の値であるかもしれない。
3. 買手は 3.3 で述べた方法に従い、情報収集操作を行うかどうかを決定する。異なるサブタスクに関して情報収集操作が可能な場合は、分岐限定法などを用いて社会的余剰の期待値が最大となる割当て計画を作成する。社会的余剰の期待値を最大にする割当計画が複数存在すれば、ランダムに一つの割当計画を選択する。

つぎに、割当計画の実行法を以下に示す。

1. 割当計画が得られれば、買手は割当計画を入札者に通知し、割当計画にある初期割当てを当座の割当てとする。
2. 情報収集操作の結果が判明すれば、買手は当座の割当てを割当計画の遷移規則にしたがって変更し、それを入札者に通知する。
3. 実行するとされたすべての情報収集操作が終了した後、最終割当てに基づいて、買手は入

札者に以下の支払いを行う。

$$\begin{aligned} \text{payment}_i = & v(AP^*) - \sum_{j \neq i} \text{cost}_j(AP^*) \\ & - (v(AP_{-i}^*) - \sum_j \text{cost}_j(AP_{-i}^*)) \end{aligned}$$

ここで、 AP^* は最適な割当計画を表し、 AP_{-i}^* は bidder i が存在しない場合の最適な割当計画を表す。支払額 payment_i は、bidder i の参加によって生じる他の入札者の期待評価値の減少分に等しい。また、タスクが実現される品質の各々に対して、その価値と同じ値を費用とするダミー入札者の存在を仮定する。これは、買手のタスク達成に対する価値を越えた支払いが生じないようにするためである。

4 提案プロトコルの性質

本章では、提案プロトコルが望ましい性質を満たすことを証明する。

証明を示す前に、簡単な例を用いて、入札者が虚偽の申告をすることで、不正に利益を得ることがない点を確認しよう。虚偽申告にも、サービス提供費用や実行可能確率など、様々な点で過大／過小申告を行うことが考えられる。ここでは、安価なサービス提供が実現する確率が小さいにも関わらず、それを過大申告して、情報収集操作に係る分の費用を獲得しようとする場合を考えよう。

例 3 例 1 と同じ設定とする。bidder 3 が、費用 1 でサービス提供できる確率が実際には 0.1 であるにも関わらず、0.5 と過大申告する場合を考える。同一の利用者が繰り返しサービスを利用することがなければ、情報収集操作の後に bidder 3 が費用が 1 でサービス提供できないと回答しても、それが 0.1 の場合なのか、0.5 の場合なのか利用者には判断できない。そのため、この虚偽申告は存在し得る。

まず、過大申告しない場合を考える。情報収集操作を行う場合、費用の期待値は $0.1 \times 1 + (1 - 0.1) \times 3 + 0.5 = 3.3$ となる。これは、情報収集操作を行わない場合の費用の期待値 3 より大きくなるため、bidder 3 による情報収集操作は行われないことになる。これは、bidder 3 がサービス提供することはないことを意味し、bidder 3 の効用は 0 である。

つぎに、過大申告する場合を考える。先に述べたように、費用 1 で提供できる確率を 0.5 と申告した場合、情報収集操作は行われることになる。このとき、bidder 3 への支払額は、 $-3 - (0.1 \times 0 + 0.9 \times 3)$ となって、確率 0.1 で 3 を支払い、確率 0.9 で 0 を支払う、すなわち、何も支払わないことになる。前者は bidder 3 が費用 1 で提供できることが判明した場合に対応し、後者は費用 1 で提供できないことが判明した場合に対応する。結局 bidder 3 の効用は、 $0.1 \times (3 - 1) + 0.9 \times 0 - 0.5 = -0.3$ となり、真実申告した場合に比べて効用が減少する。つまり、この虚偽申告は効果がない。

以下に命題を示す。

命題 1 各入札者にとって真実申告が最善の戦略となる。

証明 1 入札者 bidder i の効用は以下のように計算される。

$$\begin{aligned}
 u_i &= \text{payment}_i(AP^*) - \text{cost}_i(AP_i^*) \\
 &= v(AP^*) - \sum_{j \neq i} \text{cost}_j(AP^*) \\
 &\quad - (v(AP_{-i}^*) - \sum_j \text{cost}_j(AP_{-i}^*)) \\
 &\quad - \text{cost}_i(AP^*) \\
 &= v(AP^*) - \sum_{j \neq i} \text{cost}_j(AP^*) - \text{cost}_i(AP^*) \\
 &\quad + v(AP_{-i}^*) - \sum_j \text{cost}_j(AP_{-i}^*)
 \end{aligned}$$

買手は社会的余剰が最大となる割当計画を探索している。ここで上式を眺めると、第 1 項、第 2 項、第 3 項の和を最大化することと社会的余剰の最大化は等価であり、買手は第 1 項、第 2 項、第 3 項の和を最大化しようとすると言える。一方、第 4 項と第 5 項は bidder i の申告から独立である、すなわち、bidder i は第 4 項と第 5 項を操作できない。よって、bidder i にとって、真実申告が最善の戦略となる。□

命題 2 提案プロトコルは社会的余剰の期待値を最大化する割当てを実現できる。

証明 2 提案プロトコルは入札者の真実申告を引き出すことができる。その上で、社会的余剰の期待値

が最大となる割当て計画を求めているため、提案プロトコルは社会的余剰の期待値を最大にする割当てを実現できる。□

命題 3 提案プロトコルは期待値の上で個人合理性を満たす。

証明 3 提案プロトコルでは、社会的余剰の期待値が最大となる割当計画を求めており、bidder i の入札が最終割当てに影響を与えなければ、その入札は割当ての系列に含まれない。これは bidder i の効用が 0 であることを意味する。一方、bidder i の入札が最終割当てに含まれれば、bidder i の効用は bidder i の参加による社会的余剰の増分に等しくなる。加えて、何も割当てを受けないという可能性も存在する。よって、期待値の上での個人合理性は満たされる。なお、これは期待値の上での議論であり、情報探索操作を行い、自己のサービスが選択されなかった場合には、その費用を回収できない場合が生じる。この場合でも、期待値で見れば、個人合理性は満たされる。□

5 議論

本稿では、Web サービス合成時における価格設定の問題に対して、VCG プロトコルに基づく方法を提案した。VCG プロトコルは理論的に優れた性質を持つとされるが、一方で、計算量の問題が指摘されている。これは、実応用を対象としている Web サービスにおいては、深刻な問題と成りうる。この組み合わせオークションにおける勝者決定問題に関しては、多くの高速な計算手法が提案されており [6]、ある程度の軽減化が可能と考える。しかし、本稿での提案手法は、VCG プロトコルよりもさらに問題の複雑度が増しており、更なる高速化手法が必要となるかもしれない。

また、VCG プロトコルの枠組みを外れて、最適解を求めるという要求条件を緩和すれば、さらに高速に割当てを求めることも可能であろう。そのような場合でも、本稿での提案手法は、効率的な割当てという点での一つのベンチマークとして働くであろう。さらには、プロトコルの工夫だけでなく、運用面での工夫も考えられる。例えば、一度オークションを

行い、どの売手に情報収集操作を行わせるかというパターンを獲得し、その後の一定期間そのパターンを用いて割当て決定を行う方法が考えられる。このような方法は、インセンティブという点では追加的な検討が必要であるが、オークションの実応用の一つの形態として現実に存在するものである。これらの点に関する詳細な検討は今後の課題である。

6 むすび

本稿では、Web サービス合成の課題に対するオークション方式を提案した。サービス合成をオークションの問題として見たときに、問題となるのは対象世界の不確実性である。Web サービスは動的な世界を対象としているため、それを原因として、勝者や支払額を適切に決定することに失敗するかもしれない。この不確実性への対処としては、情報収集操作を行うことが考えられる。しかし、情報収集操作自体に費用が発生するものであり、情報収集操作を適切に取捨選択することが必要となる。本稿では、この課題に対し、社会的余剰の期待値が増加するかどうかを基準とし、固定的に割当てを決定するのではなく、情報収集操作によって得られた情報に従い、割当てを適切に変更していく方法を提案した。提案方法は、入札者の真実申告を引き出すことができる。今後の課題としては、Web サービスとしてどのように実装するかが挙げられる。Web サービスの世界では、標準化作業が進んでおり、現行の記述方式の中に、動的な価格付けの情報をどのように埋め込むかを検討しなければならない。

謝辞 本研究は日本学術振興会科学研究費基盤研究(B) (19300054, 平成19年度~21年度)の補助を受けた。

参考文献

- [1] Draper, D., Hanks, S., and Weld, D.: Probabilistic Planning with Information Gathering and Contingent Execution, *Proceedings of the Second Conference on AI Planning Systems (AIPS-04)*, 1994, pp. 31–36.
- [2] Hassine, A. B., Matsubara, S., and Ishida, T.: Constraint-based Approach for Web Service Composition, *Proceedings of the Fifthe International Semantic Web Conference (ISWC-06)*, 2006, pp. 130–143.
- [3] Ito, T., Yokoo, M., and Matsubara, S.: Designing an Auction Protocol under Asymmetric Information on Nature’s Selection, *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS-2002)*, 2002.
- [4] Mas-Colell, A., Whinston, M. D., and Green, J. R.: *Microeconomic Theory*, Oxford University Press, 1995.
- [5] 松原繁夫: 動的環境におけるオークション - 再割当て費用の組み入れ, *情報処理学会論文誌*, Vol. 47, No. 4(2006), pp. 1340–1348.
- [6] Sandholm, T.: Algorithm for optimal winner determination in combinatorial auctions, *Artificial Intelligence Journal*, Vol. 135, No. 1–2(2002), pp. 1–54.
- [7] Sirin, E., Parsia, B., Wu, D., Hendler, J., and Nau, D.: HTN Planning for Web Service Composition Using SHOP2, *Journal of Web Semantic*, Vol. 1(2004), pp. 377–396.
- [8] Suyama, T. and Yokoo, M.: Strategy/False-name Proof Protocols for Combinatorial Multi-Attribute Procurement Auction, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol. 11, No. 1(2005), pp. 7–21.