

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22700142

研究課題名(和文)ウェブを介した投票行動とゆずりあいに基づく効率的な超大規模資源割当手法の開発

研究課題名(英文) A Development of Efficient and Large-scale Resource Allocation Method based on 'Yuzuriai' and Votings via the Web

研究代表者

福田 直樹 (Fukuta, Naoki)

静岡大学・情報学研究科・講師

研究者番号：30345805

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、対象とする市場メカニズムをこれまでに研究を進めてきた組合せオークションメカニズムに絞って、超高速組合せオークションメカニズム起動エンジンの超大規模化とさらなる動作の高速化を実現した。特に、本研究開始時点で開発済みの高速勝者決定近似アルゴリズムを、より一般的な問題形式である複数ユニットオークション(1つの種類の商品が複数個存在する場合)に対応させたプロトタイプアルゴリズムの開発と、クラウドコンピューティングインフラ上での活用が期待される資源割当機構と超高速処理技術を組み合わせることで、商業利用可能な水準に向けた性能と利便性の向上を行った。

研究成果の概要(英文)：In this research, I focused my effort on extending a market mechanism called "combinatorial auction", and realized an ultra-fast combinatorial auction engine that is also capable to handle massive amount of bids in an auction. Furthermore, I extended my formerly-presented very fast winner determination approximation algorithm to capture a more general problem, called "multi-unit combinatorial auction", and presented prototype algorithms and their evaluations. Also I extended their performance and usability to be applied to a real deployment environment, by applying a good resource allocation mechanism and several fast calculation techniques to be used on a cloud-computing infrastructure.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：知的エージェント オークション

1. 研究開始当初の背景

(1)以前は主に経済学者の間で議論が進められてきた市場メカニズム理論に関する研究が、特にここ数年で、計算機科学との融合領域になってきた。この観点から構築されてきた理論の1つとして、計算論的メカニズムデザインがあり、Harvard大学のDavid Parkes教授らによって、この分野への計算機科学の貢献の可能性について指摘されてきている。

(2)これまでに計算論的メカニズムデザインの分野でめざましい発展のあったものに、組合せオークション理論に関する研究がある。組合せオークション理論では、従来のオークションにあるような単品に対する入札のみでなく、「テレビとHDレコーダーとHDMIケーブル」のような組合せ入札を認めることにより、複数者間の複合的な資源分配問題に対して効果的な資源配分を実現可能となることが主に経済学の分野で指摘されていたが、2000年代初頭ころより、CMUのThomas Sandholm教授、Stanford大学のYoav Shoham教授、Hebrew大学のNoam Nisan教授らのグループにより、その実用性を高める技術とその効果が明らかにされてきた。

この理論は、たとえば電力の時間ごとの効率的な配分問題や、有害物質排出権の最適割り当て問題など、今後社会で必要とされる複数者間で相互に競合関係を持つ資源配分問題への活用が期待されている。

(3)従来の組合せ最適化問題の多くでは、少なくとも、「どのような組合せにどのような価値があるのか」は既知であるという前提から出発していた。組合せオークション理論では、複数の参加者が存在する場合に、個々の参加者が自身の利益を優先して真実の申告をしない(例えば、本当は300ドルである資源の組合せを購入する意思があるのに、安く入手したいと考えてその価値を200ドルであると申告してしまうなどの行動をする)ことにより、「どのような組合せにどのような価値があるのか」が申告内容の集合からはわからず、結果として最適な資源割り当てができない、という問題を指摘し、そのための解決方法を提案してきた。

これに、計算論的な視点および計算機科学の知見を加えることで、従来組合せオークション理論が抱えていた組合せ爆発問題を巧妙に回避しながら現実的な解を求める手法が提案されてきている。本研究代表者は、組合せオークションにおける勝者決定の近似問題に対して、これまでにNisan教授らやShoham教授らが提案してきた手法をさらに改良し、Lehmannバイアスの導入に基づく並列型局所グリーディ検索を用いることにより、特定条件下で代表的な手法と比較して、

同程度の最適性を持つ解を最も高速に得られるアルゴリズム・実装方法を提案し、CPLEX等既存の線形計画法ソルバーと比較しても特定の条件下で優位な性能が得られることを示してきた。

(4)近年の超高速コンピューティングインフラの普及により、これまでには想像されなかった規模の実問題への組合せオークション理論を始めとする市場メカニズムの活用が期待される。

ここで課題となる点は大きく3つある。1つは、これらの高速大規模分散コンピューティングインフラを生かすような市場メカニズム実装方法の検討が未成熟であること。もう1つは、多くのこれまでの理論的研究で提案された手法では、実応用を意識した場合にその前提条件が厳しすぎることであり、主に「オークション参加者の入札対象・価格決定能力に対する仮定」と「扱う財(商品)の種類や数に対する仮定」の2つの点が特に重要となる。たとえば、先に述べた手法では、同型のテレビを複数個在庫している場合のように、複数の財の間で区別不可能な関係を効率的には扱えない。

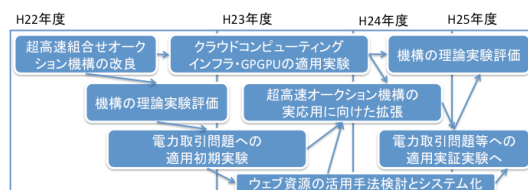
このような背景に対し、次に示す研究の目的により本研究の計画を立案した。

2. 研究の目的

資源の効果的な「ゆずりあい」を実現し、なおかつ、そうしたゆずりあいの余地を言明することが、その本人にとって決して不利にならないようにするための基盤技術を作りたい。利害が衝突する複数者間での資源の効率配分のためのメカニズムとして、これまでに経済学および計算機科学で研究されてきた理論である、計算論的メカニズムデザイン理論の近年の洗練はめざましい。本研究では、この計算論的メカニズムデザイン理論を基盤として、その理論を今日の高度・高速コンピューティングインフラ上で安全にアプリケーション化できるようにするための基盤技術の開発を目指して、本研究を遂行した。

3. 研究の方法

本研究の立案当初の研究計画の概観は下図の通りである。



(1)本研究では、背景として述べた課題の解決に向けて、市場メカニズム駆動エンジン

の高速化・大規模問題対応化を行うと共に、以前の手法にあった非現実的な仮定を緩和するための技術を開発し、実問題への適用可能性がどの程度向上できるかを明らかにする。

同時に、市場メカニズム利用者に対する支援技術として、ウェブ関連技術を応用した入札対象・価格決定支援、およびそれらの統合型システムのウェブアプリケーション化技術を開発し、その妥当性を実証的な観点から明らかにする、という方法をとった。

(2) これまでに本研究代表者が進めてきた研究では、計算論的メカニズムデザインの分野では、もっぱらメカニズムデザインにおける計算の複雑さの問題に対する理論面での考慮に起因する問題を解決することに焦点を絞ってきた。一方で、本研究では、これらのメカニズムを大規模な実応用問題へ適用する際に生じる諸問題への対処を、研究の目的の中心にすえた。

(3) 本研究に付随して、理論面では、例えば、あるメカニズムが戦略的操作不可能である（つまり、ずるいことをしても得をすることがない）ことを直接証明できない場合でも、戦略的操作可能性を示す例が計算論的に現実的な時間内には見つけられないことを実験的に検証したり、それを計算論的に保証する手法などへの展開が期待できる。

すでに、セキュリティ関連研究領域では、データの暗号化に対して、解読が不可能である（鍵が入手できない）ことを理論的に示すのではなく、暗号の解読が計算論的にきわめて困難（きわめて計算量が大きい）であることをもって、暗号の解読を試みる誘因を下げるというアプローチに一定の評価が得られつつある。

この概念を計算論的メカニズムデザインの分野に適用することで、これまでは戦略的操作不可能性などの面で理論的に妥当ではないとみなされていた高速な市場メカニズムに対して、計算論的な反証の困難性という観点から改良を加え、その頑健性を理論的・実証的に示すことで、これまでに適用不可能であった複雑・大規模な問題に対して計算論的メカニズムデザインの理論・手法を適用できるようになることが期待される。こうした周辺理論も含め、実応用に向けた基礎的研究を進めていくこととした。

4. 研究成果

(1) 平成 22 年度は、対象とする市場メカニズムをこれまでに研究を進めてきた組合せオークションメカニズムに絞り、超高速組合せオークションメカニズム起動エンジンの超大規模化とさらなる動作の高速化に特化して遂行した。

これまでにすでに、高速勝者決定近似アルゴリズムを、より一般的な問題形式である複数ユニットオークション（1つの種類の商品が複数個存在する場合）に対応させたプロトタイプアルゴリズムおよびその組み込みプラットフォームの試作と性能評価等を行っている。これらの成果は、すでにその一部および派生的な成果を国内学会および国際的な論文誌上にて報告しており、詳細な報告を次年度中に国際学会で行うべく準備を進めた。

複数ユニットオークション問題では、電力や環境物質排出権取引問題がモデル化できることが知られており、今後の世界レベルでの活用が期待される場所である。当年度の研究実施では、すでに試作したプロトタイプアルゴリズムを土台に、その大規模化のための改良を中心に実験的検証を行うための準備を進めた。同時に、クラウドコンピューティングインフラ上での活用が期待される高度分散型データベース管理システム技術や汎用グラフィックスプロセッサ (GPGPU) コンピューティング技術などの超高速処理技術を組み合わせることを考慮し、関連技術についての調査および準備的な実装を進めた。

(2) 平成 23 年度は、前年度までに実装を進めた複数ユニットオークションに対応したプロトタイプアルゴリズムおよびその実装をベースに、電力や環境物質排出権取引問題等のモデルへの適用を進め、大規模シミュレータへの適用や、そのために必要となる大規模コンピューティングインフラ（クラウドや汎用グラフィックスプロセッサ）の活用方法の検討を進めることを、大きな目標とした。また、それらの必要に応じて、アルゴリズムやメカニズムの改良および性能評価を随時行うこととした。

前年度までに、複数ユニットオークションに対応したプロトタイプアルゴリズムについては、価格付け機構を含めて、比較的順調にその開発が進んでいると考えられたことから、その理論・実装性能の解析結果を中心に、可能な範囲で国内あるいは海外の学会にて、随時成果の公表を行い、関連する研究者からのフィードバックを得られるようにした。

また、本研究と並行して、短時間で市場メカニズムを用いたアプリケーションを試作するためのインフラ技術として、ウェブ上の種々の技術を連携させることを可能とする基盤技術の改良と調整を行ってきた。本技術を、前年度までに開発したプロトタイプアルゴリズムや高度大規模コンピューティングインフラ上で活用できるようにしていくとともに、当該年度直前の 3 月に発生した震災など、現在進行中の課題に対しての適用可能性を検討した。具体的な適用対象については、当初は電力取引問題への適用を初期検討課題とし、その後社会の要請とその時間的変化

を十分に考慮して、柔軟に適切な選択をしていくようにした。その一例として、災害に頑健な都市計画や道路網設計などに対して（エージェント）シミュレーション等に基づく多くの既存のアプローチをうまく活用しながら、それらと本手法とを有機的に結合できるようにすることについて準備的な検討を行った。

(3)平成 24 年度は、前年度までに実装を進めた複数ユニットオークションに対応したプロトタイプアルゴリズムおよびその電力割当モデルへの適用手法をベースにして、そのメカニズムの大規模シミュレータへの適用や、そのために必要となる大規模コンピューティングインフラ（クラウドや汎用グラフィックプロセッサ）の活用方法に一定の目処をつけることを、大きな目標とした。また、それらの必要に応じて、アルゴリズムやメカニズムの改良および性能評価を随時行うこととした。

当年度までに、複数ユニットオークションに対応したプロトタイプアルゴリズムの応用事例についての検討を進めてきているが、その応用事例の基礎的適用事例に対する実装性能の解析結果を中心に、可能な範囲で国内および海外の学会にて適切に成果の公表を行い、関連する研究者らからのフィードバックを得るとともに、その成果の応用の機会を少しでも広げられるように努めた。

また、本研究と並行して、短時間で市場メカニズムを用いたアプリケーションを試作するためのインフラ技術として、ウェブ上の種々の技術を連携させることを可能とする基盤技術の改良と調整を行ってきた。本技術を、昨年度までに開発したプロトタイプアルゴリズムや高度大規模コンピューティングインフラ上で活用できるようにしていくとともに、2011 年 3 月に発生した震災を経て未だ大きな課題となっている電力供給問題など、当時進行中であった課題に対しての適用可能性を当該年度は前年より一歩踏み込んで検証した。具体的な適用対象については、その後の社会の要請とその時間的変化を十分に考慮して、柔軟に適切な選択をしていくようにとした。その一例として、エージェント間交渉技術など多くの既存のアプローチをうまく活用しながら、それらと本手法とを有機的に結合できるようにすることを引き続き検討し、その成果のとりまとめを行った。

(4)平成 25 年度は、前年度までに実装および解析を進めた複数ユニットオークションに対応したプロトタイプアルゴリズムおよびその電力割当モデルへの適用手法をベースにして、そのメカニズムの大規模シミュレータへの適用や、そのために必要となる大規模コンピューティングインフラ（クラウドや汎用グラフィックプロセッサ）の活用方法についての検討結果をまとめ、研究全体の総括

を行うことを大きな目標とした。また、それらの必要に応じて、アルゴリズムやメカニズムの改良および性能評価を可能な限り行い、対外的に積極的に公表していくことを、大きな目標とした。

前年度までに、複数ユニットオークションに対応したプロトタイプアルゴリズムの応用事例についての検討に基づいてその応用事例の基礎的適用事例に対する実装性能の解析結果を中心に、ある程度の研究報告を行ってきている。当年度中では、さらに国内あるいは海外の学会にて適切に成果の公表を行い、その成果の応用の機会を少しでも広げるよう努めた。

また、本研究と並行して、短時間で市場メカニズムを用いたアプリケーションを試作するためのインフラ技術として、ウェブ上の種々の技術を連携させることを可能とする基盤技術の改良と調整を行ってきた。本技術を、前年度までに開発したプロトタイプアルゴリズムや高度大規模コンピューティングインフラ上で活用できるように実装を調整・洗練した内容を成果として部分的に公表した内容の 1 つにおいて、学生共著発表が第 76 回情報処理学会全国大会にて学生奨励賞を受賞した。また、2011 年 3 月に発生した震災後に大きな課題となっている電力供給問題など、未だ進行中の課題に対しての適用可能性を検討した成果を発表し、同分野国内最大規模となる 4 学会による合同研究会である 2013 年合同エージェントワークショップ & シンポジウムにて優秀ポスター賞を単著発表にて受賞した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 9 件）

[1] Yoshihito Sano, and Naoki Fukuta, ``A GPU-based Programming Framework for Highly-scalable Multi-Agent Traffic Simulations'', Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics, Vol.18, No.4, 2014. (印刷中), 査読あり

[2] Takahisa Fujino and Naoki Fukuta, ``Utilizing Weighted Ontology Mappings on Federated SPARQL Querying'', Lecture Notes in Computer Science Vol.8388, pp. 331-347, Springer, 2014. DOI: 10.1007/978-3-319-06826-8_25, 査読あり

[3] Yoshinori Tsuruhashi and Naoki Fukuta, ``A Framework for Analyzing Simultaneous Negotiations'', Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 8291, pp.521--528, Springer, 2013. DOI:10.1007/978-3-642-44927-7_43, 査読あり

[4] 青島傳隼, 坂本翼, 横山昌平, 福田直樹, 石川博, ``文脈的なつながりを考慮したツイート群の効果的な抽出・提示手法の実現'', 情報処理学会論文誌: データベース (TOD), Vol. 6, No. 2, pp. 61--84, 2013. 査読あり

[5] Naoki Fukuta, ``An Approach to VCG-like Approximate Allocation and Pricing for Large-scale Multi-unit Combinatorial Auctions'', Journal of Information Processing, Vol. 21, No. 1, pp. 9-15, 2013. DOI: 10.2197/ipsjip.21.9 査読あり

[6] Naoki Fukuta, and Takayuki Ito, ``An Approach to Sustainable Electric Power Allocation Using a Multi-Round Multi-Unit Combinatorial Auction'', Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 7580, pp. 48--53, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-35612-4_4, 査読あり

[7] Naoki Fukuta, ``A Preliminary Empirical Analysis of Mobile Agent-Based P2P File Retrieval'', pp. 143--154, Studies in Computational Intelligence, Vol. 365, Springer 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-01639-4_17, 査読あり

[8] Naoki Fukuta, Takayuki Ito: ``An Efficient Winner Approximation for a Series of Combinatorial Auctions'', pp. 233-246, Communications in Computer and Information Science, Vol. 67, Springer, 2010. DOI: 10.1007/978-3-642-11819-7_18 査読あり

[9] Naoki Fukuta and Takayuki Ito: An experimental analysis of biased parallel greedy approximation for combinatorial auctions, International Journal of Intelligent Information and Database Systems, Vol. 4, No. 5, pp. 487--508, Inderscience, 2010. DOI: 10.1504/IJIDS.2010.035773, 査読あり

[学会発表] (計 24 件)

[1] 稜野寿章, 福田直樹: LOD 検索におけるエンドポイント探索への Budget-Limited Multi Armed Bandit に基づく最適化手法適用への検討, 第 76 回情報処理学会全国大会講演論文集, 6T-7, 2014. 3 (学生奨励賞受賞)

[2] Naoki Fukuta, ``A Preliminary Implementation on Pricing Mechanisms for Electric Resource Control Markets'', Proc. 3rd International Workshop on Knowledge

and Service Technology for Life, Environment, and Sustainability (KASTLES2013), pp. 338--342, 2013.

[3] Hiroki Noguchi, Takahisa Fujino, and Naoki Fukuta, ``On Implementing SPARQLoid and its Query Coding Support Framework -- Querying with Weighted Ontology Mappings'', Proc. The 3rd Joint International Semantic Technology Conference (JIST2013), 2013. (demonstration)

[4] Hiroki Noguchi, Takahisa Fujino, and Naoki Fukuta, ``On Implementing a SPARQLoid Query Coding Support -- Vocabulary Discovery for Queries with Weighted Ontology Mappings'', Proc. International Workshop on Linked Data in Practice (LDPW2013), 2013.

[5] 福田直樹: 留保価格を考慮した大規模複数ユニット組合せオークションの近似価格決定に関する一考察, 人工知能と知識処理研究会, 電子情報通信学会技術研究報告, pp77-82, 福岡 (2013. 11)

[6] Naoki Fukuta, ``A Market-based Agent-mediated Resource Control Framework for Middle-scale Smart Grids'', Proc. the 2013 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT2013), 2013. (poster)

[7] 福田直樹: 中規模スマートグリッドに向けたエージェント仲介型資源制御フレームワークの試作, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS2013), 2013. 9 (ポスター発表, 優秀ポスター賞受賞)

[8] Yoshinori Tsuruhashi and Naoki Fukuta, ``An Analysis Framework for Meta Strategies in Simultaneous Negotiations'', Proc. the Sixth International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN2013), 2013.

[9] Takafumi Ishikawa and Naoki Fukuta, ``A Prototype System for Federated Cloud-Based Resource Allocation by Automated Negotiations Using Strategy Changes'', Proc. the Sixth International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN2013), 2013.

[10] Naoki Fukuta and Takayuki Ito, ``On Implementing a Market-based Agent-mediated Resource Control Framework for

Middle-scale Smart Grids: A Preliminary Study'', IEEE International Workshop on Knowledge and Service Technology for Life, Environment, and Sustainability (KASTLES2012), Dec. 2012.

[11] Naoki Fukuta and Takayuki Ito, ``A Preliminary Experimental Analysis on Combinatorial Auction-based Electric Power Allocation for Manufacturing Industries'', Proc. 3rd International Workshop on Green Computing and Sustainable Society (GCSS'12), Dec. 2012.

[12] 福田直樹: "組合せオークションに基づく製造業事業所向け電力割当に関する一考察", 合同エージェントワークショップ&シンポジウム(JAWS2012), 2012. 10

[13] 鶴橋吉矩, 福田直樹: "複数エージェントに対する同時交渉におけるメタ交渉戦略解析手法の検討", 第 26 回人工知能学会全国大会講演論文集, 1L1-R-7-3, 2012. 6

[14] Naoki Fukuta, ``Toward a Simulation of Combinatorial Auction-based Electric Power Allocation -- A Preliminary Study--'', Proc. IIAI International Symposium on Applied Informatics (ISAI2012), pp. 18--21, May 2012.

[15] Yoshinori Tsuruhashi and Naoki Fukuta, ``A Preliminary Toolkit for Analyzing Meta-strategies in Simultaneous Negotiations among Agents'', Proc. IIAI International Symposium on Applied Informatics (ISAI2012), pp. 26--29, May 2012.

[16] 秋山拓也, 福田直樹: "進化的アプローチとエージェントシミュレーションによる災害に頑健な道路網設計法の検討", 第 74 回情報処理学会全国大会講演論文集, 4T-3, 2012. 3

[17] Naoki Fukuta, and Takayuki Ito, ``An Approach to Sustainable Electric Power Allocation Using a Multi-Round Multi-Unit Combinatorial Auction'', Proc. International Workshop on Multi-agent Smart computing (MASmart2011), pp. 67--81, 2011.

[18] 福田直樹, 情報処理学会知能システム研究会, モバイルエージェント技術とその応用に関する研究動向と考察, 開催地: 熱海後楽園ホテル, 2011. 10. 28 (招待講演)

[19] 福田直樹, 伊藤孝行: "再生可能エネルギーを考慮した最適電力配分への複数ユニ

ット組合せオークションの適用に関する一考察", 合同エージェントワークショップ&シンポジウム(JAWS2011), 2011. 10.

[20] 福田直樹, 電気関係学会東海支部連合大会シンポジウム「新しい社会の仕組みを創造する先端情報技術」, "再生可能エネルギーを考慮したスマートグリッド上での資源配分動的最適化に向けたオークション技術", 開催地: 三重大学, 2011. 9. 26 (招待講演)

[21] Naoki Fukuta, ``Toward a VCG-like Approximate Mechanism for Large-scale Multi-unit Combinatorial Auctions'', Proc. IEEE/ACM/WIC International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT2011), pp. 317--322, 2011.

[22] Naoki Fukuta, Towards Better Approximation of Resource Allocation, Keynote talk of 2nd International Symposium on Applied Informatics (ISAI2011), 開催地: Kaminoyama, Yamagata JAPAN, 2011. 8. 9 (招待講演)

[23] 電子情報通信学会総合大会チュートリアル企画「Webと集合知」, 「セマンティックWebと集合知」, 講演者(森田武史, 福田直樹), 開催地: 東京都市大学, 2011. 3. 15. (震災のため講演は中止. 既発表扱い.), (招待講演)

[24] 福田直樹, 伊藤孝行: アプリケーション組み込みに向けた高速組合せオークション実行エンジンの実装, 人工知能と知識処理研究会, 電子情報通信学会研究技術報告, 京都, (2010. 9)

[図書] (計 1 件)

[1] Quan Bai and Naoki Fukuta (Eds.), Advances in Practical Multi-Agent Systems, Studies in Computational Intelligence, Vol. 325, Springer, 2011, 474p. ISBN 978-3-642-16097-4

[その他]

研究代表者ホームページ

<http://whitebear.cs.inf.shizuoka.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 直樹 (FUKUTA, Naoki)

静岡大学・情報学研究科・講師

研究者番号: 30345805

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし