

機関番号：14501

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2010

課題番号：19300048

研究課題名（和文）ユビキタス時代における次世代型電子商取引システムのための基盤技術

研究課題名（英文）Fundamental Technologies for Developing a Next-generation E-commerce System in the Ubiquitous-computing Era

研究代表者

平山 勝敏（HIRAYAMA KATSUTOSHI）

神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授

研究者番号：00273813

研究成果の概要（和文）： 来るべきユビキタス時代における次世代型電子商取引システムの基盤となる種々の分散最適化技術を開発した。また、この技術は、電子商取引システムに止まらず、より一般的に個人や組織のプライバシーやセキュリティを保ちながら社会的効用を最大化する未来社会の基盤テクノロジーとなり得ることも分かった。本研究を通して、あらためてその認識を深めることができ、次の段階へ進むための準備が整った。

研究成果の概要（英文）： We have developed various distributed optimization technology, which can be a basis of next-generation e-commerce systems in the upcoming era for ubiquitous computing. We have also realized that this technology will certainly become a fundamental technology in the near future, since it can deal with any domain that requires maximized social welfare while preserving privacy and security for individuals. Through this research project, we have come to deeply understand this feature of distributed optimization and now get ready to make this project go further.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
2008年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2009年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2010年度	3,300,000	990,000	4,290,000
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野： 制約充足，最適化，マルチエージェントシステム

科研費の分科・細目： 情報学・知能情報学

キーワード： エージェント、分散最適化、電子商取引

## 1. 研究開始当初の背景

一般に、組織の枠を越えた最適化が行われれば、資源の浪費を避けて効率的な生産等が可能になる。例えば、Collaborative コマース（Cコマース）では、発注元と発注先が、互いの業務プロセスに深く入り込んで情報を共有し、共同で業務を推進する。しかしながら、組織のセキュリティ/プライバシーや、管理の権限の壁によって、結び付きの強い下請

企業と提携企業等の場合を除いて、そのような組織の枠を越えた最適化を達成することは困難である。

## 2. 研究の目的

本研究では、高度な分散最適化技術を開発することにより、組織の枠を越えた最適化を達成し、より広範な状況において効率的な生産活動を支援する次世代型電子商取引シス

テムの構築を目指す。そのためには、既存の分散最適化技術である分散制約最適化問題とそのアルゴリズム、および、一般化相互割当問題とそのアルゴリズム等を格段に発展させる必要がある。

### 3. 研究の方法

既存の分散最適化技術の問題点を明確にし、機能的に不足している側面については、問題の定式化を見直して必要に応じて定式化の拡張を試みる。また、性能的に不足している側面については、アルゴリズムの改良およびヒューリスティクスの導入などを試みる。

### 4. 研究成果

期間中、年3回程の研究打合せ会議を実施し、メンバー間で研究の進捗状況を確認するとともに、回によっては関連分野の外部講師を招いて見聞を広めるよう努めた。その結果、主に以下の研究成果が得られた。

#### (1) 解精度保証付き分散ラグランジュ緩和プロトコル

一般化相互割当問題に対する従来のプロトコルであるDisLRP<sub>L</sub>には、効率的に実行可能解を発見できるが、解の品質を保証できないという問題がある。そこで本研究では、各エージェントが常に指定した水準・以上の局所解を生成するよう既存のプロトコルを拡張し、収束後の実行可能解の品質が指定した水準以上となることを保証したプロトコルDisLRP<sub>U</sub>を開発した。評価実験により、 $\cdot$ の値により実行可能解の品質が実際に直接制御可能であり、また、実行可能解の品質と収束までの時間にはトレードオフの関係があることがわかった。

なお、本研究の成果は、人工知能分野の難関国際会議の一つである AAAI-2007 に採択されており、国際的に高い評価を得ている。

#### (2) 資源制約付き分散制約最適化問題に対するアルゴリズム

資金や計算・通信資源などの資源制約を明示的に扱うには資源制約付き分散制約最適化問題としてシステムをモデル化することが望ましい。同問題に対する従来のアルゴリズムでは、資源制約を通常の制約と同様に扱い基本的に Adopt をそのまま適用する。しかし、そのような素朴な方法では、変数の順序付けに用いる疑似木が深くなり、一般に探索コストが大きくなる。本研究では、この問題に対処するため、資源制約を通常の制約ではなく仮想変数として表現する方法を提案した。すなわち、資源制約を無視した疑似木を

生成し、それにより順序付けされた変数ノードとその子ノード間の資源配分を表現する仮想変数を導入した上で Adopt を実行する。評価実験によれば、単一資源の問題、および、資源の充足率が低い問題において提案手法は従来手法よりも効率的であることがわかった。

なお、本研究の成果は、人工知能分野の難関国際会議の一つである AAAI-2008 に採択されている。また、その発展版が人工知能学会論文誌に採択されており、国内外で高い評価を得ている。

#### (3) 上下界をオンラインで計算する分散ラグランジュ緩和プロトコル

一般化相互割当問題を解く従来の分散ラグランジュ緩和プロトコルでは、各財の効用値のスケールが変わるとその性能が劣化するという問題がある。本研究では、プロトコル実行中にオンラインで大域情報（上界値と下界値）を収集し、各財の価格の更新幅であるステップ長をその大域情報を用いて適応的に決める Adaptive DisLRP という新しいプロトコルを提案した。Adaptive DisLRP は、大域情報を収集するためのコストは掛かるが、従来手法である DisLRP<sub>U</sub>、および、その変形版に比べ、広範囲の問題例においてタイトな上界値を与える解に収束することを実験により示した。

なお、本研究の成果は、エージェント分野の難関国際会議の一つである AAMAS-2009 に採択されている。また、その発展版が人工知能学会論文誌に採択されており、国内外で高い評価を得ている。

#### (4) 分散制約最適化問題のための Directed Soft Arc Consistency アルゴリズム

本研究では、分散制約最適化問題 (DCOP) の厳密解法を効率化する Directed soft arc consistency アルゴリズムを提案した。DCOP の厳密解法では、一般に、Pseudo-tree を利用して最良優先探索戦略によるバックトラック探索を並列に実行するが、DCOP の評価関数が広範囲の値をとる場合には、反復的な探索が増え、探索コストが増大する。これに対し先行研究では、動的計画法にもとづく前処理により探索の枝刈りに有効な評価関数値を推定し、さらに、推定値を利用するために探索アルゴリズム自体を加工して効率化を図っていた。本提案手法では、Directed soft arc consistency アルゴリズムを Pseudo-tree 上でボトムアップに適用し、元の DCOP を、より簡単に解くことができる等価な DCOP に変換する。この前処理より、従来の厳密解法を用いても探索コストを十分に削減できることを実験により示した。

なお、本研究の成果は、エージェント分野

の難関国際会議の一つである AAMAS-2009 に採択されている。また、その発展版が人工知能学会論文誌に採択されており、国内外で高い評価を得ている。

#### (5) 限量記号付き分散制約問題に対するアルゴリズム

エージェントが制御できないパラメータが存在し、かつ、そのパラメータが敵対的な主体によって制御されることを想定した新しい問題である、限量子付き分散制約充足問題 (Quantified DisCSP) , および、限量子付き分散制約最適化問題 (Quantified DCOP) の定式化を提案した。また、Quantified DisCSP に対しては非同期バックトラッキングアルゴリズムを拡張した解法、Quantified DCOP に対しては ADOPT アルゴリズムに min-max/alpha-beta 法を適用する解法をそれぞれ提案した。

なお、これらの研究の成果は、エージェント分野の難関国際会議の一つである AAMAS-2010 に採択されている。また、その発展版が人工知能学会論文誌に採択されており、国内外で高い評価を得ている。

#### (6) 分散制約最適化問題に基づく提携構造形成問題に対する近似アルゴリズム

本研究では、ゲーム理論における提携型ゲームの特性関数を分散制約最適化問題を用いて簡略記述し、提携構造形成問題を解く近似アルゴリズムを開発した。提携型ゲームの課題の一つは特性関数の記述量が組合せ爆発を起こすことである。そこで、分散制約最適化問題を用いて非明示的に特性関数を記述し、さらに、その表現形式のもとで提携構造形成問題を解く近似アルゴリズムを開発した。また、このアルゴリズムが任意の近似精度保証を達成することを示した。

なお、本研究の成果は、人工知能分野の難関国際会議の一つである AAAI-2010 に採択されている。また、その発展版が人工知能学会論文誌に採択されており、国内外で高い評価を得ている。

以上が今回実施した主な研究の成果である。それ以外にも、分散最適化技術と関連の深いいくつかの研究にも取り組んだ。例えば、分散センサーネットワークに関する研究、分散カメラ資源割当に関する研究、重み付き部分 Max-SAT に対するラグランジュ分解に関する研究、動的 SAT に対するラグランジュ分解に関する研究、過制約な一般化相互割当問題に関する研究、などである。

東日本大震災を経験し、限りある資源を有効利用するために組織を越えた分散協調的な最適化を目指す技術の必要性が益々高まりつつある。本研究で開発した技術が、今後

のさらなる研究の基盤として役立つことを期待したい。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- (1) 上田俊, 岩崎敦, 横尾真, Marius C. Silaghi, 平山勝敏, 松井俊浩: 分散制約最適化問題に基づく提携構造形成問題, 人工知能学会論文誌, Vol.26, No.1, pp.179-189, 2011, 査読有.
- (2) 馬場里美, 岩崎敦, 横尾真, Marius C. Silaghi, 平山勝敏, 松井俊浩: 敵対者に対応する協調問題解決: 限量記号付き分散制約充足問題, 人工知能学会論文誌, Vol.26, No.1, pp.136-146, 2011, 査読有.
- (3) 平山勝敏, 松井俊浩, 横尾真: 分散ラグランジュ緩和プロトコルにおける適応的な価格更新, 人工知能学会論文誌, Vol.26, No.1, pp.59-67, 2011, 査読有.
- (4) Suguru Ueda, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo, Marius C. Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Toshihiro Matsui: Coalition Structure Generation based on Distributed Constraint Optimization, Proceedings of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2010), pp.197-203, 2010, 査読有.
- (5) Satomi Baba, Makoto Yokoo, Toshihiro Matsui, Atsushi Iwasaki, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Naofumi Nishimura: Cooperative Problem Solving against Adversary: Quantified Distributed Constraint Satisfaction Problem, Proceedings of the 9th International Joint Conference on Autonomous Agents & Multi-Agent Systems (AAMAS-2010), pp.781-788, 2010, 査読有.
- (6) Toshihiro Matsui, Makoto Yokoo, Satomi Baba, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Hiroshi Matsuo: A Quantified Distributed Constraint Optimization Problem, Proceedings of the 9th International Joint Conference on Autonomous Agents & Multi-Agent Systems (AAMAS-2010), pp.1023-1030, 2010, 査読有.
- (7) 松井俊浩, Marius C. Silaghi, 平山勝敏, 横尾真, 松尾啓志: 分散制約最適化問題へのソフトウェア統合の適用, 人工知能学会論文誌, Vol.25, No.3, pp.410-422, 2010, 査読有.

- (8) 松井俊浩, Marius C. Silaghi, 平山勝敏, 横尾真, 松尾啓志: 資源制約に束縛されない pseudo-tree を用いた資源制約付き分散制約最適化問題の解法, 人工知能学会論文誌, Vol. 24, No. 5, pp. 417-427, 2009, 査読有.
- (9) Marius C. Silaghi, Makoto Yokoo: ADOPT-ing: unifying asynchronous distributed optimization with asynchronous backtracking, Journal of Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol. 19, pp. 89-123, 2009, 査読有.
- (10) Katsutoshi Hirayama, Toshihiro Matsui, Makoto Yokoo: Adaptive Price Update in Distributed Lagrangian Relaxation Protocol, Proceedings of the 8th International Joint Conference on Autonomous Agents & Multi-Agent Systems (AAMAS-2009), pp. 1033-1040, 2009, 査読有.
- (11) Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Hiroshi Matsuo: Directed Soft Arc Consistency in Pseudo Trees, Proceedings of the 8th International Joint Conference on Autonomous Agents & Multi-Agent Systems (AAMAS-2009), pp. 1065-1072, 2009, 査読有.
- (12) Kazuhiro Ohta, Toshihiro Matsui, Hiroshi Matsuo: Layered Distributed Constraint Optimization Problem for Resource Allocation Problem in Distributed Sensor Network, Proceedings of 12th International Conference on Principles of Practice in Multi-Agent Systems (PRIMA 2009), pp. 245-260, 2009, 査読有.
- (13) Manish Jain, Matthew Taylor, Milind Tambe, Makoto Yokoo: DCOPs Meet the RealWorld: Exploring Unknown Reward Matrices with Applications to Mobile Sensor Networks, Proceedings of 21th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2009), pp. 181-186, 2009, 査読有.
- (14) 黒田陽之, 平山勝敏: Multi-MaxSAT: ラグランジュ分解・調整法を用いた Weighted Max-SAT の解法, 電子情報通信学会論文誌D, Vol. J92-D, No. 1, pp. 51-60, 2009, 査読有.
- (15) Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Hiroshi Matsuo: Resource Constrained Distributed Constraint Optimization with Virtual Variables, Proceedings of the 23rd AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2008), pp. 120-125, 2008, 査読有.
- (16) Katsutoshi Hirayama: An  $\epsilon$ -approximation protocol for the generalized mutual assignment problem, Proceedings of the 22nd AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2007), pp. 744-749, 2007, 査読有.
- (17) Toshihiro Matsui, Hiroshi Matsuo: Improvement of efficiency in pseudo-tree based distributed best first search, IAENG International Journal of Computer Science, Vol. 34, Issue 1, pp. 73-77, 2007, 査読有.
- (18) 貝嶋浩次, 松井俊浩, 松尾啓志: 確率的な分散制約最適化手法を用いたセンサ網の資源割り当て手法の提案, 情報科学技術レターズ (FIT2007), pp. 173-177, 2007, 査読有.
- (19) Marius C. Silaghi, Makoto Yokoo: Dynamic DFS tree in ADOPT-ing, Proceedings of the 22nd AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-2007), pp. 763-769, 2007, 査読有.
- (20) Marius C. Silaghi, Makoto Yokoo: Revisiting ADOPT-ing and its Feedback Schemes, Proceedings of the 2007 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT-2007), pp. 3-10, 2007, 査読有.

[学会発表] (計 17 件)

- (1) 花田 研太, 平山 勝敏: 過制約な一般化相互割当問題に対する分散ラグランジュ緩和プロトコル, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2010 (JAWS-2010), 2010 年 10 月 28 日, 北海道富良野市.
- (2) 波多野 大督, 杉本 雄太, 平山 勝敏: 値変更コスト付き動的 SAT のためのモデル追跡, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2010 (JAWS-2010), 2010 年 10 月 27 日, 北海道富良野市.
- (3) 松井俊浩, 松尾啓志: 分散制約最適化手法における複数解の展開と枝刈りの併用, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2010 (JAWS-2010), 2010 年 10 月 27 日, 北海道富良野市.
- (4) 川東勇輝, 松井俊浩, 松尾啓志: 分散制約最適化問題の解法 Max-Sum における評価関数の緩和手法, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2010 (JAWS-2010), 2010 年 10 月 27 日, 北海道富良野市.
- (5) 沖本天太, 岩崎敦, 横尾真: 誘導幅に基づく分散制約最適化問題の精度保証付き

- 近似解法の提案, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2010 (JAWS-2010), 2010年10月27日, 北海道富良野市.
- (6) 馬場里美, 岩崎敦, 横尾真: モンテカルロ法を用いた限量記号付き制約充足問題の実時間アルゴリズム, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2010 (JAWS-2010), 2010年10月27日, 北海道富良野市.
- (7) Katsutoshi Hirayama, Daisuke Hatano, Yuta Sugimoto: Model Tracking for Dynamic SAT with Decision Change Costs, 10th Workshop on Preferences and Soft Constraints (SofT-10), Sep. 6, 2010, St. Andrews, Scotland.
- (8) 加藤伸哉, 松井俊浩, 松尾啓志: 分散制約最適化手法を適用した協調カメラ網アルゴリズムと実装, 電子情報通信学会パターン認識・メディア理解 (PRMU) 研究会, 2010年3月15日, 鹿児島県鹿児島市.
- (9) 太田和宏, 松井俊浩, 松尾啓志: 階層化された分散制約充足/最適化手法を用いた分散センサ網における観測資源割り当ての検討, 2009年9月2日, 宮城県仙台市.
- (10) Satomi Baba, Naofumi Nishimura, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo: Cooperative Problem Solving against Adversary: Quantified Distributed Constraint Satisfaction Problem, IJCAI-09 Workshop on Distributed Constraint Reasoning, Jul. 13, 2009, Pasadena, U. S. A.
- (11) 平山勝敏, 松井俊浩, 横尾真: 分散ラグランジュ緩和プロトコルにおける適応的な価格更新, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2008 (JAWS 2008), 2008年10月29日, 滋賀県大津市.
- (12) 加藤伸哉, 松井俊浩, 松尾啓志: 確率的な分散制約最適化手法を用いた分散カメラ資源割り当て手法の実装, 情報科学技術フォーラム (FIT2008), 2008年9月2日, 神奈川県藤沢市.
- (13) Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Hiroshi Matsuo: Resource constrained DCOP solver using virtual variables and conventional pseudo-tree, AAMAS-2008 Workshop on Distributed Constraint Reasoning, May 13, 2008, Estoril, Portugal.
- (14) 黒田陽之, 平山勝敏: Multi-MaxSAT: ラグランジュ分解・調整法を用いたMax-SATの解法, 合同エージェントワーク

ショップ&シンポジウム 2007, 2007年10月31日, 沖縄県宜野湾市.

- (15) 松井俊浩, 松尾啓志: 応用的な分散センサ網における観測資源割り当て問題の検討, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム 2007, 2007年10月29日, 沖縄県宜野湾市.
- (16) 行方裕紀, 松井俊浩, 松尾啓志: 分散制約最適化手法を用いたコアロケーションスケジューリングへの適用, FIT2007第6回情報科学技術フォーラム, 2007年9月6日, 愛知県豊田市.
- (17) 松井俊浩, 松尾啓志: 擬似的な木を用いたボトムアップな非同期分散最適化手法の効率改善, 第21回人工知能学会全国大会, 2007年6月22日, 宮城県宮崎市.

[図書] (計0件)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平山 勝敏 (HIRAYAMA KATSUTOSHI)  
神戸大学・大学院海事科学研究科・准教授  
研究者番号: 00273813

### (2) 研究分担者

松尾 啓志 (MATSUO HIROSHI)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 00219396

松井 俊浩 (MATSUI TOSHIHIRO)  
名古屋工業大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 60437093

横尾 真 (YOKOO MAKOTO)  
九州大学・大学院システム情報科学研究科・教授  
研究者番号: 20380678

飯塚 泰樹 (IIZUKA YASUKI)  
東海大学・理学部・准教授  
研究者番号: 80580844

### (3) 連携研究者

シラギ マリウス (SHILAGHI MARIUS)  
フロリダ工科大学・計算機科学部・助教  
研究者番号: なし