

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300060

研究課題名(和文)分散グリーンコンピューティング：分散最適化技術の環境関連問題への応用

研究課題名(英文) Distributed Green Computing: Application of Distributed Optimization Technique to Environmental Issues

研究代表者

平山 勝敏 (Hirayama, Katsutoshi)

神戸大学・海事科学研究科(研究院)・教授

研究者番号：00273813

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,900,000円、(間接経費) 4,470,000円

研究成果の概要(和文)：これまでに開発してきた分散最適化技術(分散制約最適化アルゴリズムや分散ラグランジュ緩和法など)を適用できる問題の規模および範囲の面でさらに発展させるとともに、それらを環境関連問題に応用するための基本的な定式化技法の考案とアルゴリズムの性能評価を行なった。これらの基礎および応用研究の結果、分散グリーンコンピューティングを実現する基盤技術としての分散最適化技術の可能性と課題が明らかになり、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 polished up our distributed optimization techniques including distributed constraint optimization algorithms and distributed Lagrangian relaxation methods so that they can deal with various problem instances with a larger number of agents. Furthermore, we have formulated some problems that are related to environmental issues as distributed optimization problems and evaluated the performance of our distributed algorithms on such realistic problems. Through these basic and applied work on distributed optimization algorithms, we have come to realize the possibilities and current limitations of this technology and now got prepared to make this project go one step further.

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：分散最適化 エージェント グリーンコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

スマートグリッドなど次世代の社会的インフラの効率的な運用、サーバーやデータセンターの消費電力削減など環境に関する問題では、個々の参加者の行動を調整して無駄を省くことにより、社会全体の効用を最大化する必要がある。この問題は分散最適化問題として定式化でき、複数エージェントによる分散最適化アルゴリズムにより効果的に解決できる可能性が高い。

2. 研究の目的

本研究では、分散最適化アルゴリズムを、適用できる問題の規模および範囲の面で飛躍的に発展させるとともに環境関連問題へ応用し、「分散グリーンコンピューティング」の基盤技術とする。

3. 研究の方法

本研究では、上記の目的を達成するために主に以下の5つの部分テーマに取り組んだ。

- (1) 一般化相互割当問題の定式化の拡張
- (2) 分散制約最適化アルゴリズムの効率化
- (3) 多目的分散制約最適化問題
- (4) 分散協調型エネルギー供給量決定プロトコル
- (5) 分散協調型車両運用計画

4. 研究成果

期間中、以下の通り計7回のDCR (Distributed Constraint Reasoning) 研究会を主催し、研究発表および情報交換を行うとともに適宜外部講師を招いて関連分野の情報収集に努めた。

【DCR 研究会開催実績】

- | | | |
|-----|---------|----------|
| 第1回 | H23年12月 | 兵庫県神戸市 |
| 第2回 | H24年3月 | 福岡県朝倉市 |
| 第3回 | H24年5月 | 神奈川県箱根町 |
| 第4回 | H24年9月 | 鹿児島県屋久島町 |
| 第5回 | H25年3月 | 高知県高知市 |
| 第6回 | H25年9月 | 滋賀県彦根市 |
| 第7回 | H26年3月 | 沖縄県与那国町 |

その結果、各テーマについて以下の研究成果が得られた。

(1) 一般化相互割当問題の定式化の拡張

従来的一般化相互割当問題では、実行可能な例と実行不可能な例をそれぞれ別の方法で定式化する必要がある。そこで、それらを統一する新しい枠組みを考案した。具体的には、割り当てられないジョブ数を最小化し、そのもとでエージェントへのジョブの割り当てコストの総和を最小にする新しい定式化を提案し、これにより実行可能な例と実行不可能な例が統一的に扱えることを確認した。また、この新しい定式化のもとでラグランジュ分解に基づく新しい分散解法を考案した。

なお、これらの研究成果のうち、実行不可能な例を扱う定式化を提案した論文がエー

ジェント分野の主要な国際会議 PRIMA-2011 にフルペーパーで採択され、同国際会議において学生優秀論文賞を受賞した。また、その拡張版が情報処理学会論文誌に掲載された。さらに、統一的な定式化を提案した論文が電子情報通信学会論文誌に掲載された。

(2) 分散制約最適化アルゴリズムの効率化

分散制約最適化アルゴリズムの性能を改善するための幾つかの研究を行なった。

従来アルゴリズムの多くは、基本的に1エージェントあたり1変数という単純な問題を想定して設計されていたのに対し、1エージェントあたり複数変数という複雑な問題を扱う新しいアルゴリズムを考案した。また、提案アルゴリズムは1エージェントあたり1変数という単純な問題でも効率的に動作することが判明した。なお、この研究成果をまとめた論文が人工知能分野の難関国際会議の一つであるIJCAI-2013にフルペーパーで採択されており、国際的に高い評価を得ている。

分散制約最適化問題に対する代表的な非厳密解法であるMaxSumにおいて、値の優先順序を利用することにより性能が向上することを示した。この研究成果をまとめた論文がエージェント分野の主要な国際会議PRIMA-2013にフルペーパーで採択されている。

分散確率的局所探索法を多重に実行するポートフォリオ型の解法を考案し、その性能評価を行なった。また、確率モデルを用いた解析により最適解を推定することを考案した。これらの研究成果をまとめた論文がエージェント分野の国際会議の一つであるKESAMSTA-2012に採択されている。また、最適解推定については、情報処理学会第76回全国大会において口頭発表を行い、その時点での最新の成果を公表している。

(3) 多目的分散制約最適化問題

問題の性質上、多目的最適化に関する研究を強化する必要がある。平成24年度より新たな研究分担者を迎えて多目的分散制約最適化問題に関する研究を開始した。

分散制約最適化アルゴリズムのうち、特に探索ベースのアルゴリズムを多目的分散制約最適化問題に拡張し、その性能評価を行なった。その研究成果をまとめた論文がエージェント分野における主要な国際会議の一つであるPRIMA-2012にフルペーパーで採択されている。

多目的制約最適化問題では、パレート最適解が代表的な解概念だが、一般にその数は膨大なもので何らかの手段で候補となる解を限定する必要がある。この問題に対して、ユーザーとの対話を通してパレート最適解を逐次生成する方法を提案した。その研究成果をまとめた論文が制約プログラミングにおける難関国際会議の一つであるCP-2012に採択

されている。またその拡張版が人工知能学会論文誌に掲載された。

多目的分散制約最適化問題に対して、ユートピア解からのノルムを用いた動的計画法をベースとする解法を考案し、その性能評価を行なった。また、近似精度保証のある非厳密解法を考案し、その性能評価を行なった。これらの研究成果をまとめた論文が電子情報通信学会論文誌に掲載された。

(4) 分散協調型エネルギー供給量決定プロトコル

分散最適化技術の環境関連問題への応用として、エネルギーの供給地と需要地が協調して効率的なエネルギー配分量を求める新しいアルゴリズムを考案する。本研究では、この問題を、複数供給地と複数需要地からなる2部グラフ上の施設配置問題として定式化し、それを解く分散協調型プロトコルを設計した。このプロトコルは、前述した一般化相互割当問題のために開発したラグランジュ分解に基づく分散解法をベースに設計されている。また、2部グラフ以外の一般的な形状のグラフにも対応できるように、中継エージェントを導入することを試みた。本研究成果の一部については、人工知能学会第25回全国大会において口頭発表を行い、その時点での最新の成果を公表している。

(5) 分散協調型車両運用計画

資源の効率的な利用のために鉄道会社は益々効率的に車両を運用することが求められている。本研究では、複数鉄道会社による共同乗入れ路線において、関連会社間で協調して効率的な車両運用計画を求める問題を想定し、これを分散制約充足問題あるいは分散制約最適化問題として定式化して新しいアルゴリズムを考案した。まずは、分散制約充足アルゴリズムをベースとしたアルゴリズムを構成し、性能評価を行なった。その結果、局所問題が充足不能のときのアルゴリズムの性能に課題があることが判明した。その後、局所問題を数理計画モデルにより定式化し、複数の評価基準を選んで選択的に最適化できるようなシステムのプロトタイプを作成した。本研究成果の一部について、人工知能学会第27回全国大会において口頭発表を行い、その時点での最新の成果を公表している。

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26件)

谷藤拓麻, 松井俊浩, 松尾啓志, 分散制約最適化問題の異なる精度保証付き非厳密解法の統合手法, 人工知能学会論文誌, 査読有, Vol.29, No.3, pp.277-287, 2014.

DOI: 10.1527/tjsai.29.277

Toshihiro Matsui, Hiroshi Matsuo, Complete Distributed Search Algorithm for Cyclic Factor Graphs, Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART-2014), 査読有, pp. 184-192, 2014, <http://www.icaart.org/?y=2014>

Tenda Okimoto, Tony Ribeiro, Maxime Clement, Katsumi Inoue, Modeling and Algorithm for Dynamic Multi-Objective Weighted Constraint Satisfaction Problem, Proceedings of the 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART-2014), 査読有, pp. 420-427, 2014, <http://www.icaart.org/?y=2014>

花田研太, 平山勝敏, 多層一般化相互割当問題の定式化とその解法, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, Vol. J96-D, No.12, pp.2908-2919, 2013, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-d_12_2908

沖本天太, 山本将, 櫻井祐子, 横尾真, 井上克巳, 分散制約最適化問題: 擬似木に基づくハイブリッド型の解法の提案, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, Vol. J96-D, No.12, pp.2920-2928, 2013, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-d_12_2920

沖本天太, 櫻井祐子, 横尾真, 井上克巳, 多目的分散制約最適化問題における厳密/非厳密解法の提案, 電子情報通信学会論文誌 D, 査読有, Vol. J96-D, No.12, pp.2929-2938, 2013, http://search.ieice.org/bin/summary.php?id=j96-d_12_2929

Daisuke Hatano, Katsutoshi Hirayama, DeQED: an Efficient Divide-and-Coordinate Algorithm for DCOP, Proceedings of the 23rd International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-2013), 査読有, pp.566-572, 2013, <http://ijcai.org/papers13/Papers/IJCAI13-091.pdf>

Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Hiroshi Matsuo, Embedding Preference Ordering for Symmetric DCOP Solvers on Spanning Trees, Proceedings of the 16th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA-2013), 査読有, pp.197-212, 2013, DOI:10.1007/978-3-642-44927-7_14

沖本天太, ジョヨンジュン, 岩崎敦, 横尾真, 多目的制約最適化問題における対話型解法の提案, 人工知能学会論文誌, 査読有, Vol.28, No.1, pp.57-66, 2013,

DOI: 10.1527/tjsai.28.57

松井俊浩, Marius C. Silaghi, 平山勝敏, 横尾真, 松尾啓志, 限量記号付き分散制約最適化問題のための分散探索手法, 人工知能学会論文誌, 査読有, Vol.28, No.1, pp.43-56, 2013, DOI: 10.1527/tjsai.28.43

波多野大督, 平山勝敏, 値推移コスト付き動的制約充足問題とその解法, 人工知能学会論文誌, 査読有, Vol.28, No.1, pp.34-42, 2013, DOI: 10.1527/tjsai.28.34

Toshihiro Matsui, Hiroshi Matsuo, Considering Equality on Distributed Constraint Optimization Problem for Resource Supply Network, Proceedings of the 2012 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT-2012), 査読有, pp.25-32, 2012, DOI: 10.1109/WI-IAT.2012.22

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動的な変更手法, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol.53, No.11, pp.2419-2431, 2012, <http://id.nii.ac.jp/1001/00087038/>

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とプロトコル, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol.53, No.11, pp.2370-2378, 2012, <http://id.nii.ac.jp/1001/00087033/>

Tenda Okimoto, Yongjoon Joe, Atsushi Iwasaki, Toshihiro Matsui, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Interactive Algorithm for Multi-Objective Constraint Optimization, Proceedings of the 18th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-2012), 査読有, pp. 561-576, 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-33558-7_41

Toshihiro Matsui, Marius C. Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Hiroshi Matsuo, Distributed Search Method with Bounded Cost Vectors on Multiple Objective DCOPs, Proceedings of the 15th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA-2012), 査読有, pp.137-152, 2012, DOI: 10.1007/978-3-642-32729-2_10

Yasuki Iizuka, The Optimal Solution Attainment Rate of the Multiplexing Method, Proceedings of the 6th International KES Conference on Agents and Multiagent Systems -- Technologies and Applications, 査読有, pp.319-329, 2012, DOI:

10.1007/978-3-642-30947-2_36

Tenda Okimoto, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo, Effect of DisCSP Variable-ordering Heuristics in Scale-free Networks, Multiagent and Grid Systems, 査読有, Vol.8, No.2, pp.127-141, 2012, DOI: 10.3233/MGS-2012-0189

Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, Analysis for Distributed Cooperation based on Linear Programming Method, Proceedings of the 4th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART-2012), 査読有, pp.228-233, 2012, <http://www.icaart.org/ICAART2012/>

Kenta Hanada, Katsutoshi Hirayama, Distributed Lagrangian Relaxation Protocol for the Over-constrained Generalized Mutual Assignment Problem, Proceedings of the 14th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA-2011), 査読有, pp.174-186, 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-25044-6_15

21 Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Boi Faltings and Hiroshi Matsuo, Reducing the Search Space of Resource Constrained DCOPs, Proceedings of the 17th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-2011), 査読有, pp.576-590, 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-23786-7_44

22 太田和宏, 松井俊浩, 松尾啓志, 分散制約最適化問題の階層化と分散センサ網における観測資源割当て問題への適用, 人工知能学会論文誌, 査読有, Vol.26, No.6, pp.657-669, 2011, DOI: 10.1527/tjsai.26.657

23 Yasuki Iizuka, Kayo Iizuka, Exceeding the Efficiency of Distributed Approximate Algorithms Enabling by the Multiplexing Method, Proceedings of the Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems - 15th International Conference (KES-2011), 査読有, pp.366-377, 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-23854-3_39

24 沖本天太, ジョヨンジュン, 岩崎敦, 横尾真, 疑似木に基づく分散制約最適化問題の精度保証付き非厳密解法の提案, 情報処理学会論文誌, 査読有, Vol.52, No.12, pp.3786-3795, 2011, <http://id.nii.ac.jp/1001/00079581/>

25 沖本天太, 岩崎敦, 横尾真, 分散制約充足問題: 特定の制約網に特化した変数順序付けヒューリスティックの提案, 情報

処理学会論文誌, 査読有, Vol. 52, No. 11,
pp. 3018-3029, 2011,
<http://id.nii.ac.jp/1001/00078399/>

- 26 Tenda Okimoto, Yongjoon Joe, Atsushi Iwasaki, Makoto Yokoo, Boi Faltings, Pseudo-Tree-Based Incomplete Algorithm for Distributed Constraint Optimization with Quality Bounds, Proceedings of the 17th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP-2011), 査読有, pp. 660-674, 2011, DOI: 10.1007/978-3-642-23786-7_50

〔学会発表〕(計 15 件)

飯塚泰樹, 分散制約最適化問題における近似解法を使った最適解の推定, 情報処理学会第 76 回全国大会, 2014 年 3 月 11 ~ 13 日, 東京都足立区

Dong-Gyun Kim, Katsutoshi Hirayama, Gyei-Kark Park, Ship Collision Avoidance using Distributed Local Search, 14th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (ISIS-2013), 2013 年 11 月 13 ~ 16 日, 韓国大田市

下牧昌太郎, 尾松郁哉, 平山勝敏, SAT による車両運用計画問題の定式化と集中 / 分散解法, 2013 年度人工知能学会全国大会 (第 27 回), 2013 年 6 月 4 ~ 7 日, 富山県富山市

Tenda Okimoto, Naoto Ikegai, Tony Ribeiro, Katsumi Inoue, Hitoshi Okada, Hiroshi Maruyama, Cyber Security Problem based on Multi-Objective Distributed Constraint Optimization Technique, 1st Workshop on Systems Resilience, 2013 年 6 月 24 日, ハンガリー・ブダペスト

木下克也, 飯塚泰樹, 効果的な災害避難のための分散マルチエージェントアプローチ, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2012, 2012 年 10 月 24 ~ 26 日, 静岡県掛川市

松井俊浩, 松尾啓志, 分散制約最適化問題のための対称な協調探索アルゴリズムの検討, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム 2012, 2012 年 10 月 24 ~ 26 日, 静岡県掛川市

岩下和真, 松井俊浩, 松尾啓志, Action-GDL における集中処理化と情報漏洩を考慮する Junction-Tree の変形手法, 第 11 回情報科学技術フォーラム, 2012 年 9 月 4 ~ 6 日, 東京都小金井市

浅野大介, 松井俊浩, 松尾啓志, 分散ラグランジュ緩和プロトコルにおける局所情報にもとづく価格更新の効果, 第 11 回情報科学技術フォーラム, 2012 年 9 月 4 ~ 6 日, 東京都小金井市

下牧昌太郎, 平山勝敏, 節集合分割型分散 SAT に対する非同期バックトラッキングアルゴリズム, 2012 年度人工知能学会全国大会 (第 26 回), 2012 年 6 月 12 ~ 15 日, 山口県山口市

飯塚泰樹, 分散制約最適化問題における多重化解法による最適解到達率の制御, 情報処理学会第 74 回全国大会, 2012 年 3 月 6 ~ 8 日, 愛知県名古屋市

平山勝敏, マルチエージェントシステムにおける分散最適化問題とその解法, 人工知能基本問題研究会 (第 85 回) (招待講演), 2012 年 2 月 2 日, 岐阜県下呂市

柳田大輝, 松井俊浩, 松尾啓志, 分散制約最適化問題の k-Optimality に基づく解法の多重化, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム (JAWS-2011), 2011 年 10 月 26 ~ 28 日, 静岡県熱海市

飯塚泰樹, 分散制約最適化問題のための多重化近似アルゴリズムの最適解到達率の設定, 合同エージェントワークショップ & シンポジウム (JAWS-2011), 2011 年 10 月 26 ~ 28 日, 静岡県熱海市

谷口賀則, 平山勝敏, 複数供給源からの分散協調型エネルギー供給量決定プロトコル 2011 年度人工知能学会全国大会 (第 25 回), 2011 年 6 月 1 ~ 3 日, 岩手県盛岡市

松井俊浩, 松尾啓志, 資源供給ネットワークにおける分散協調的な資源割り当て手法の検討, 2011 年度人工知能学会全国大会 (第 25 回), 2011 年 6 月 1 ~ 3 日, 岩手県盛岡市

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

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・教授
研究者番号：00273813

(2) 研究分担者

松井 俊浩 (MATSUI, Toshihiro)
名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号：60437093

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

沖本 天太 (OKIMOTO, Tenda)
大学共同利用機関法人情報・システム研究機構・新領域融合研究センター・特任助教
研究者番号：10632432

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

松尾 啓志 (MATSUO, Hiroshi)
名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授
研究者番号：00219396

(3) 連携研究者

シラギ マリウス (SILAGHI, Marius)
フロリダ工科大学・コンピュータサイエンス学部・准教授
研究者番号：なし

波多野 大督 (HATANO, Daisuke)
国立情報学研究所・ビッグデータ数理国際研究センター・特任研究員
研究者番号：10709728