

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 30 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330257

研究課題名(和文)大規模分散共有資源の最適化に向けた協調問題解決アルゴリズムの高度化

研究課題名(英文) Improving Distributed Cooperative Problem Solving for Optimization of Large-scale and Practical Shared Resources Allocation

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、大規模・複雑な分散システムにおける、共有資源のための分散最適化について検討した。人工知能分野におけるマルチエージェントシステムの基本問題である分散制約最適化問題を基礎として、比較的複雑な構造や目的を持つ分散共有資源にかかわる分散最適化問題と解法に取り組んだ。電力スマートグリッド上の資源共有などを動機付けとし、大規模・複雑な問題のための階層的な近似解法、サンプリングに基づく解法の改良を提案した。また、非線形・不連続性を伴う連続値変量を伴う問題のための分散最適化手法に取り組んだ。さらに、参加者の利益の調整のための公平性を指標とする問題を分散制約最適化問題に導入した。

研究成果の概要(英文)：We studied the distributed optimization for resource allocation on large-scale and practical distributed systems. We addressed optimization problems and solution methods for relatively complex distributed shared resource allocation based on Distributed Constraint Optimization methods in multiagent system research.

Our motivated domain includes resource allocation on networks such as power smart grids. For the problems, hierarchical approximation and sampling based solution methods are studied and improved. We also addressed the distributed optimization for the classes of problems with nonlinear and discontinuous variables. Another important direction of our study was the distributed optimization problems with criteria of equality. We addressed classes of Multi-objective and Asymmetric Distributed Constraint Optimization Problems that simultaneously optimize individual preferences of agents.

研究分野：マルチエージェントシステム

キーワード：マルチエージェントシステム 分散協調問題解決 分散制約最適化 資源割り当て

## 1. 研究開始当初の背景

(1)分散共有資源の最適化: 複数の地点に分散して配置された共有資源を, 需要へ適切に供給することは, 様々な研究分野における主要な最適化問題である. その代表例である電力スマートグリッド上の, 節電を考慮した需要の調整, 自然エネルギーやプラグイン・ハイブリッド車からの供給の制御は, 利用者間の利害調整も含む多面的な最適化問題である. また, 自動車共有制度やクラウド計算における機材の割り当てなど, 今日注目されている持続可能社会, グリーン IT の各システムも類似の最適化問題を含む.

(2)参加者主体の協調モデル: 利用者や管理者などの参加者またはその代理のソフトウェアが, 互いの情報を交換して利益を調整し資源の配分を決定する仕組みは, 利用者側意思決定の要素を残すことにより, 一定のプライバシーを秘匿し, 利用者の意図を担保できる点で重要である. 集中システムでもこのモデルを仮想的に構成できる.

(3)汎用的な分散最適化手法: 情報交換を介して連携する自律的な要素からなるシステム上で, 分散共有資源を最適化することは, 人工知能分野の一領域である協調問題解決の応用研究である. 応用の多様化に対して, 分散システム上の最適化問題の本質を汎用的にモデル化し, その解法を構成する研究が注目されている. 汎用的なモデルと解法は, 応用システム開発におけるアルゴリズム, プロトコルのひな形となる. 「分散制約最適化問題」はこのような研究分野である. 実際的な最適化のための拡張も注力されている.

(4)大規模・複雑な分散資源のための理論モデル: 大規模分散資源の最適化に適用可能な理論モデルを構築するための課題に, (a)実システム規模の大規模広域環境への適応, (b)多様な資源の最適化を扱うための非線形連続・離散領域の問題への対応, (c)利用者間の利益調整を適切に表現する公平性などの高度な最適化指標がある. これらの課題は, 今後の実際的な資源割り当てにおける分散最適化において特に重要であると考えられる.

## 2. 研究の目的

本研究は, 従来の分散制約最適化手法を拡張することを主体とし, 以下の3つの課題に取り組む.

(1)大規模・複雑な環境に適用可能な解法: 従来の分散制約最適化問題の研究で対象とされる問題の規模は比較的小規模であり, その規模を拡大するために, 従来型の解法を見直し, 大規模問題に適用可能な解法を明らかにする. この基本となる手法は, 近似的解法を誤差と計算量を考慮しつつ選択的に活用す

ることと, 問題を階層構造により複数に分割し, 解法を適用することである.

(2)多様な資源の最適化を扱うための非線形連続・離散領域の問題への対応: 従来の分散制約最適化問題は, 組み合わせ探索に代表される離散最適化問題である. また, 関連研究分野では, 線形計画法やニュートン法などの数値計算的手法が分散システム上の最適化の枠組みに展開されている. 利用者の利益の指標と電力系統の制御パラメータなど, これらの双方を必要とする複雑な分散共有資源の最適化手法を明らかにする. その主体は, 非線形な評価関数と連続・離散変数を含む問題に対応する解法である.

(3)利用者間の利益調整を適切に表現する公平性などの高度な最適化指標: 従来の分散制約最適化問題は, 単一の大域的な目的関数を最適化する問題が一般的である. これに対して, 複数利用者への資源供給では, 社会全体の利益の合計を最適化するのみでは不十分であり, 公平性などのより高度な指標が伴う. このような指標の定義と, それにもとづく評価値の計算手法を明らかにする. 多目的最適化など, 個々の要素の利益の調整を題材とする問題の指標を導入する.

## 3. 研究の方法

(1)大規模・複雑な問題に適用可能な解法: スケールアップのために問題を分割し厳密性を妥協する解法について検討する. また, 網羅的な探索を妥協し, 準最適解を得る解法を得る手法についても検討する.

例題として, 大規模資源供給網上の分散資源割当て問題をモデル化する. 電力スマートグリッドに代表される資源供給網上の分散資源を利用者に配分する問題を中心的な題材として検討を進める.

解法階層的に問題を分割する手法を導入する. 階層の抽出方法を形式的に整理し, 分割された問題ごとに解法を適用し, それらを統合する手法を開発する. また, 大規模な解空間に対する近似的解法について検討する.

(2)不連続性, 非線形性を含む, 連続・離散領域の問題の解法: 従来の分散制約最適化手法や数値計算的解法のみでは扱いが困難な複合的な問題の解法を目指す.

資源供給網における事例を解析し, 利用者の行動選択を表す離散変数や, 資源の供給・消費量を表す連続値変数からなる問題を検討する. 解法として, 離散最適化手法と連続値最適化手法を階層的に結合した分散アルゴリズムを導入する.

(3)公平性などを含む最適化指標: 公平性を伴う最適化の指標と評価値の計算手法を開発する. 参加者が個々の利益に関心を持つ場合の利害調整を扱う関連研究をもとに, 公平

性や不満などの指標とその評価関数を定義する。多目的最適化問題や、意思決定理論における社会厚生関数との関係についても検討する。また、それらの指標を分散制約最適化手法に取り込むために、従来解法を拡張する。

#### 4. 研究成果

(1) 大規模・複雑な資源供給網上の資源割り当てのための階層的な近似解法と異種解法の統合手法：大規模資源供給網上の分散資源割り当てのための問題のモデル化および、階層構造と近似的手法にもとづく解法を検討した。電力スマートグリッドを動機付けとする資源供給網を分散協調型のクラスタリングアルゴリズムにより階層的に分割し、クラスタ木上で解探索を適用することにより資源の割り当てを決定する手法を提案した。これにより、従来解法の適用が困難な問題においても比較的高い程度で実行可能解を得た。

また、分散制約最適化問題の二種類の近似解法を統合し、エージェント近傍の部分問題における局所探索と、大域的な情報の収集を伴う動的計画法を併用することにより、計算コストを抑制しつつ解の精度を向上する手法を提案した。また、多項制約を含む、より一般的な問題を表現するグラフ構造である factor graph に適用できるように解法を改良した。これらは従来型の問題と解法に対し新たな近似による解品質と計算コストとのトレードオフを導入するものであり、大規模、複雑な問題に適用可能な解法の基礎と考えられる。

(2) 連続変数を持つ資源割り当て問題のための分散最適化手法：非線形な連続・不連続変数を持つ資源割り当て問題のための分散最適化手法について検討した。通信ネットワーク上で連続変数を持つ通信帯域を送信ノードに割り当てる分散資源割り当て問題を、分散制約最適化問題の部分クラスに帰着し、その解法を帰着された分散制約最適化問題に適用する手法を提案した。また、確率的山登り法に基づく分散制約最適化手法を連続変数に拡張する手法を提案した。

連続・非線形な分散最適化問題のための従来解法で用いられる数値計算を微分不可能な問題に適応し、リスタート戦略を用いる手法について検討した。

電力スマートグリッド網を動機付けとする資源供給網上の分散最適化問題を解く従来解法を拡張した。本来は連続量の電力量を分散化のために標本化する際に、誤差を調整する範囲を求め、電力網上の制約条件を満足するように標本値を補間する手法を導入した。これにより、標本数を抑制した状況でも、比較的高い実行可能性を得た。これらは、分散最適化が主体であった、分散制約最適化問題を補う連続変数の最適化手法であり、実際の

な問題における一方向性を示すものであると考えられる。

(3) 参加者の選考における公平性を考慮する分散制約最適化問題：資源割り当てにおける公平性を考慮する分散最適化問題について検討した。理論面において基礎的な公平性の指標である leximin を問題の評価指標として導入し、解法の演算を拡張した。特に、leximin を動的計画法により分解することや、目的値を表すベクトルの境界の導入により、従来型の分散制約最適化手法を拡張した厳密解法を示した。これにより、パレート最適性などを満足し、効率性と公平性のある程度のバランスがある解を得た。

さらに、公平性を考慮する問題をもとに、グラフ表現の一般化と近似的な解法の影響について検討した。任意の項数の関数を表現する factor graph の場合に解法を拡張した。また、複雑な問題を近似する発見的手法を提案し、近似による解品質の影響が主に最小の利益となるエージェントに関することを示した。これらは、従来の単一目的最適化では表現が困難な参加者の利益の調整を分散最適化の枠組で解く手法の基礎検討として重要な成果であると考えられる。

(4) 大規模な解空間の問題のためのサンプリングに基づく解法の検討：大規模な問題、エージェントが多数の状態を持つ問題、実際の資源量のような連続値を離散化した問題など、網羅的な探索が困難な場合に適用可能な木探索とサンプリングに基づく解法について検討した。サンプリングの理論的な正確さを緩和し、必要な記憶を削減する手法を示し、解品質への影響について分析した。

また、木探索におけるサンプリングと枝刈り手法との併用について検討した。木構造と局所探索を用いるサンプリングに基づく解法について、局所的な協調の導入およびサンプリングの並行の可能性を模索した。

(5) 動的な問題への強化学習の適用：動的な分散環境における資源割り当て手法として、部分観測性やマルコフ性を伴う問題の解法を検討した。エージェントの協調学習と個別学習のトレードオフ、学習モデルに含まれる協調行動を決定する分散制約最適化問題のための最適化手法をスケーラブルな非厳密解法にした場合の効果と影響について検討した。また、電力スマートグリッドのモデル上の資源割り当て最適化に階層的な強化学習の枠組を適用した。

以上の分散制約最適化手法の拡張的な領域の問題と解法を中心とする検討から一定の成果と知見を得た。これらは、分散最適化手法を実際のな問題に適用する際の基礎として意義があると考えられる。

## 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 6 件)

① 松井俊浩, 松尾啓志, 複数解の展開と枝刈りを用いる分散制約最適化手法, 電子情報通信学会論文誌, vol. J97-D, no. 8, 2014, pp. 1273-1283

② 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, vol. 29, no. 3, 2014, pp. 277-287

③ Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo and Hiroshi Matsuo, "Leximin Asymmetric Multiple Objective DCOP on Factor Graph", Proc. 18th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2015), 2015, pp 134-151

④ Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo and Hiroshi Matsuo, "Leximin Multiple Objective Optimization for Preferences of Agents", Proc. 17th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2014), pp 423-438, Gold Coast, Australia (2014.12)

⑤ Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, Complete Distributed Search Algorithm for Cyclic Factor Graphs, Proc. 6th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2014), 2014, pp. 184-192

⑥ Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, Distributed Cooperative Optimization on Cluster Trees, Proc. 2013 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT2013), 2013, pp. 25-32

[学会発表] (計 11 件)

① Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, Multiple Sampling and Cooperative Search Strategy on Sampling-Based Distributed Constraint Optimization Method, 2015 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT2015), 2015. 12

② Toshihiro Matsui, Masayuki Kaneko, Yuho Takama and Hiroshi Matsuo, Reducing the Number of Samples in Distributed

Cooperative Solution Method for Resource Supply Networks, 2014 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT2014), 2014. 8

③ Toshihiro Matsui, Marius Silaghi, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Hiroshi Matsuo, Embedding Preference Ordering for Symmetric DCOP Solvers on Spanning Trees, 16th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems (PRIMA 2013), 2013. 12

④ 増田清貴, 松井俊浩, マルコフ的動的分散制約最適化問題への非厳密解法の適用, 第 14 回情報科学技術フォーラム, (FIT2015), 2015. 9

⑤ 富板雅大, 松井俊浩, 分散制約最適化問題の解法 DUCT における冗長なサンプリング結果の削減, 第 14 回情報科学技術フォーラム (FIT2015), 2015. 9

⑥ 羽佐田智之, 松井俊浩, 松尾啓志, 連続変数を持つ分散制約最適化問題の解法における非線形最適化手法の拡張, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS 2014), 2014. 10

⑦ 川畑佑記, 松井俊浩, 松尾啓志, マルチエージェントマイクログリッドモデルにおける協調学習の導入, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS 2014), 2014. 10

⑧ 谷藤拓麻, 松井俊浩, 松尾啓志, 分散制約最適化問題の Factor Graph における非厳密解法の統合, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS 2014), 2014. 10

⑨ 松井俊浩, 松尾啓志, 分散制約最適化問題の擬似木にもとづく探索における anytime 性についての検討, 合同エージェントワークショップ&シンポジウム (JAWS 2014), 2014. 10

⑩ 川畑佑記, 松井俊浩, 松尾啓志, ND-POMDP の解法 CL におけるポリシーの組み合わせ数と通信量の削減手法, 第 13 回情報科学技術フォーラム (FIT2014), 2014. 9

⑪ 羽佐田智之, 松井俊浩, 松尾啓志, 連続変数の分散制約最適化問題のための解法, 第 12 回情報科学技術フォーラム (FIT2013) 2013. 9

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松井 俊浩 (MATSUI, Toshihiro)

名古屋工業大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60437093

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし