

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月23日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22700144

研究課題名（和文）動的環境における応用システムのための分散協調問題解決処理系の生成手法

研究課題名（英文）A study of generating distributed cooperative problem solver for practical and dynamic environments

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

研究成果の概要（和文）：

分散システムにおける複数の自律的な計算主体の協調動作に関する研究分野であるマルチエージェント・分散協調問題解決の応用と高度化のために、分散制約最適化手法の動的環境への適用手法や、分散協調アルゴリズムの合成手法について検討を行った。従来の分散制約最適化問題の本質的な問題、および解法における部分解やコストの計算の形式的な表現を分析した。また、この検討の過程で得られた知見に基づいて、従来の分散制約最適化手法を改良した。応用問題における検討として、ネットワーク上の資源をエージェントの公平性を考慮して配分する手法と、時系列的な問題への拡張を行った。

研究成果の概要（英文）：

We studied several techniques to improve distributed cooperative optimization methods. How to apply the solution methods to complex situations including dynamic environments and how to integrate distributed algorithms into appropriate solution methods have been mainly investigated. We analyzed the substantial representations of the distributed constraint optimization problems and their solution methods. Based on the above investigations, improved solution methods have been developed. We also applied cooperative optimization methods to resource allocation problems on the resource supply networks where the equality of the agents and the sequence of the allocation problems are considered.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2010年度 | 900,000 | 270,000 | 1,170,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2012年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| | | | |
| 総計 | 1,900,000 | 570,000 | 2,470,000 |

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：探索・論理・推論アルゴリズム，分散協調問題解決

1. 研究開始当初の背景

分散システムを、複数の自律的な計算主体(エ

ージェント)の協調動作としてとらえる、マルチエージェント・分散協調問題解決に関する研究は1990年代から継続的に行われてい

る。その応用システムとして、近年では、スマートグリッド、クラウド型の通信システム、分散センサ網などへの適用が検討されている。これらは、社会貢献における重要性とともに、学術的、技術的な面でも興味深い分散システムの応用例である。このような技術の基礎的な研究分野に、分散制約最適化がある。分散制約最適化では、複数のエージェントがかかわる資源やタスクの状態を変数で表わし、それらの関係を目的関数や制約条件として表わす。そして、その最適化問題を分散アルゴリズムによって解く。この研究分野は、2000年代に入り注目され、人工知能分野の主要な国際会議でも議題となっている。分散制約最適化を含む協調問題解決手法を、応用システムに適用するための、重要な課題として次の点が挙げられる。

1) 動的な問題に適用可能な分散制約最適化手法

刻一刻と変動する環境における協調問題解決は応用システムに不可欠であるが、十分に完成されたとは言い難い状況にある。このような問題解決では即応性に注目し、状態遷移モデルにもとづく手法が用いられる傾向がある。しかし、状態遷移モデルは背後にある解法の動作を逐一記述するものであり、高度な問題解決のためには多数かつ複雑な状態を考慮しなければならない。これに対して、分散制約最適化に代表されるような汎用的な表現と解法を用いる手法は問題の表現の柔軟性で優れる点があるが、以前の時刻から現在に至る問題の変化の扱いと、即応性に課題がある。動的に変化する問題への適用は、分散制約最適化手法の応用面で重要であるが、関連研究でも散発的に議論される程度であり、このような用途に容易に組み込めるような手法の拡張と体系化は課題の一つである。

2) 高度な分散協調アルゴリズムの合成手法

基礎的な分散アルゴリズムを合成して高度な分散協調アルゴリズムを生成するための方法論は、キラーアプリケーション開発をめざす応用面においても、高度かつ複合的なアルゴリズムの研究においても重要である。応用システムでは、協調問題解決手法は単体では何ら意味をなさず、各エージェントの観測情報による協調問題の生成(入力)から、合意の形成(出力)にいたるまでの動作を全て分散協調処理として統合する必要がある。さらに、効果的な処理のためには、各アルゴリズムがシームレスに反復するように、合成されなければならない。その一方で、協調問題解決手法自体に注目すると、比較的高度な手法

は複数の分散アルゴリズムに分解できる。すなわち協調問題解決手法の研究段階においても、分散協調アルゴリズムの合成手法は不可欠である。しかし、このような切実な課題であるにもかかわらず、その扱いがきわめて煩雑であることから、分散アルゴリズムの合成に関する議論は置き去りにされている実情がある。

2. 研究の目的

本研究は、分散システムにおける複数の自律的な計算主体の協調動作に関する研究分野であるマルチエージェント・分散協調問題解決の応用と高度化のために、分散制約最適化手法の動的環境への適用手法や、分散協調アルゴリズムの合成のための手法および関連する知見を得ることを目的とした。

とくに、スマートグリッド、クラウド型の通信装置、分散センサ網などの実環境で動作する応用システムに組み込み可能な、分散協調処理系の構成方法を明らかにすることを重視した。特に、次の点を主要な研究目標として検討を進めた。

1) 従来研究の静的な問題に対する分散協調問題解決手法を、動的な環境に容易に適用するためのアルゴリズムの拡張

2) 応用システムの要素となる複数の分散協調問題解決手法を、効果的に統合するための方法論

これらにより、従来は基礎研究の対象にとどまっていた分散協調アルゴリズムの応用システムへの適用、分散協調アルゴリズム研究開発の高度化への貢献を目指した。

3. 研究の方法

1) 動的な問題に対する分散制約最適化手法

動的に変化する問題は、分散制約最適化手法の基礎である、集中型の制約充足問題でも検討されている。時刻とともに変化する制約充足問題の系列を扱う動的制約充足問題の研究では、「解の継承」(以前と現在の問題の解を「近く」する制約を与え、出力の変動を抑制する)、「学習による即応」(以前の解探索でえられた情報を利用して、現在の問題の解を速やかに求める)、「安定な解」(次の時刻の問題でも再利用可能な解を推定する)が議論される。これらのうち、「解の継承」および「学習による即応」に関連する概念を分散制約最適化問題に反映する手法について検討した。

また、変動する環境に追従する統合的な分散協調アルゴリズムを構成するためには、複数のエージェントによる環境の観測、協調問題

解決、合意形成を反復する統合的な分散協調アルゴリズムが必要である。このために最適化手法が複雑なプロトコルであることや、単一故障点の存在は望ましくない。そこで多段階の処理を用いず、各エージェントが対称的に動作する分散制約最適化手法の拡充を検討した。

2) 複合的な分散協調アルゴリズムの構成手法

比較的高度な分散制約最適化手法の理解と拡張の基礎として、複数の基礎的な分散アルゴリズムをもとに複合的な分散アルゴリズムを合成する、という観点からの分析を行った。とくに、各アルゴリズムで用いられる変数間の依存関係にもとづくデータフロー解析・統合は、複数のアルゴリズムを効果的につなぎ合わせるために重要である。また反復的に統合される処理のために必要となる論理時刻の管理方法についても検討し、これらを踏まえたモデルを整理した。

また、上記の事項を逆向きの観点からとらえれば、既存の分散制約最適化手法のアルゴリズムのうち複合的な側面を持つものについて、要素アルゴリズムへの分解とそれらの依存関係の分析を行うことに相当する。とくに、当該分野において良く知られている、木探索と枝刈りを応用した手法は、複数の基礎的な分散アルゴリズムを統合しているが、オールインワンの処理を簡潔に表現するように構成され、その統合方法は直感による部分が多い。このために、アルゴリズムに内包される重要な計算の理解が他者には難しい上、さらに改良を行う場合にアルゴリズムの再構成が複雑になる。このような複合的なアルゴリズムの要素と統合方法を明確にすることを試みた。

4. 研究成果

1) 複合的な分散協調問題解決アルゴリズムを構成する手法の検討

変動する環境に追従する分散協調アルゴリズムのために重要な、動的な分散制約最適化および、複合的な分散協調アルゴリズムを構成する手法の基礎的な検討を行った。この検討の過程において、特に分散制約最適化手法の構成要素の分析と、それらの要素を合成する方法に重点を置いた。この方針にもとづき、分散処理として表現される探索アルゴリズムに含まれる処理単位の詳細なデータフローを考慮して、メッセージ交換型の分散処理系を構成する方法を検討した。具体例として、動的計画法および分枝限定法に基づく厳密解法を対象とし、従来の分散制約最適化手法にお

いて本質的な、部分解やコストの計算の形式的な表現を整理した。この検討は、今後の研究における分散協調アルゴリズム合成手法の基礎としての重要性があると考えられる。さらにこの検討の過程で得られた知見に基づいて、従来の分散制約最適化手法を改良した。この効率化手法では、前述の分枝限定法と動的計画法を併用する解法の枠組みにおいて、記憶とメッセージのサイズの制限のもとで複数の解を同時に展開する。このような手法は、従来解法を一般化する表現であるとともに、複合的な探索戦略を用いる解法の基礎検討としての意義があると考えられる。

2) 分散制約最適化手法の拡充と改良

動的環境に分散制約最適化手法を適用する場合には、冗長性・頑健性を持つような拡張が望まれる。このような拡張が期待される分散アルゴリズムに注目し、各エージェントが同等の処理を対称に実行する解法の枠組みについて検討した。この枠組みを用いる動的画法に基づく従来解法に、木探索処理を導入した解法とその課題点を示した。また、この解法の処理は、従来の木探索型の解法と異なり、単一の段階のみで構成が可能であるため、前後処理と組み合わせた全体の分散処理において、プロトコルの複雑さが少ない解法として、実際の動的なシステムに組み込む際に有利であると考えられる。

さらに、問題や解法を形式的に操作する手法の一検討として、ジャンクション木と呼ばれるグラフ構造上で元の問題を解法に適するように変形する手法を改良し、エージェントのプライバシー情報の漏えいを軽減する手法を示した。ジャンクション木は、従来から用いられている疑似木と呼ばれるグラフ構造よりも、問題を容易に表現する視点を与えるため、このような木の上での形式的操作についての知見を拡充したことは、問題を構成する前処理の高度化に寄与すると考えられる。

3) ネットワーク上の共有資源割り当てへの応用

上記の検討で得られた知見に基づき、応用的な問題への適用を検討した。ここでは資源に関する大域的制約を含む問題を解く解法を含め、各種の分散最適化アルゴリズムを開発した。特に、時系列的な問題の活用方法の一つとして、資源割り当て問題において生じる、エージェント間の不平等な状況を時系列方向に拡散させるための手法を提案した。さらに、これと関連して分散制約最適化とは異なる種類の最適化手法の分散処理化についても検討した。線形計画問題の解法である単体法を複数エージェントにより協調的に実行

するための基本的なデータフローとプロトコルを示した。また、ラグランジュ緩和と双対の概念に基づくジョブ/資源割り当て問題の解法について改良手法を示した。これらは、資源割り当てを含む比較的高度な応用問題への分散協調型の最適化手法を適用する試み一端としての意義があり、今後の発展的な研究が期待できると考えられる。

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 3 件)

- ① 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り当て問題への適用, 人工知能学会論文誌, 査読有, vol. 26, no. 6, 2011, 657-669
- ② 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, 2012, 2419-2431
- ③ 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, 有, vol. 28 no. 1, 2013, 43-56

[学会発表] (計 10 件)

- ① Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, A Study for Representations of Distributed Cooperative Search Algorithms Based on Pseudo-Trees, Proc. 10th WSEAS International Conference on Software Engineering, Parallel and Distributed Systems (SEPADS 11), 査読有, 2011, 172~179
- ② Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, A Distributed Cooperative Search Algorithm using Multiple Contexts and Pruning, Proc. 26th ISCA International Conference on Computers and Their Applications (CATA 2011), 査読有, 2011, 1~8
- ③ Toshihiro Matsui and Hiroshi Matsuo, Analysis for Distributed Cooperation based on Linear Programming Method, Proc. 4th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART2012), 査読有, 2012, 228-233
- ④ Toshihiro Matsui, Hiroshi Matsuo, Considering Equality on Distributed Constraint Optimization Problem for

Resource Supply Network, Proc. the 2012 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, 査読有, 2012, 25-32

- ⑤ 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 JAWS 2010, 2010
- ⑥ 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年人工知能学会全国大会, 2011
- ⑦ 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 (FIT2012) 講演論文集, 査読有, vol. 2, 2012, 47-54
- ⑧ 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 (FIT2012) 講演論文集, 査読有, vol. 2, 2012, 39-46
- ⑨ 松井俊浩, 松尾啓志, エージェント間のコスト配分の均衡を考慮する分散制約最適化手法の検討, 2012年度人工知能学会全国大会(第26回), 2012
- ⑩ 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 JAWS 2012, 2012

[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