

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330268

研究課題名(和文) 動的環境における多目的分散制約最適化問題の解法

研究課題名(英文) Algorithm for Dynamic Multi-Objective Distributed Constraint Optimization

研究代表者

沖本 天太 (Okimoto, Tenda)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号：10632432

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では動的環境における多目的分散制約最適化に関する研究を行った。まず、多目的分散制約最適化アルゴリズムとして、すべてのパレート最適解が求解可能な厳密アルゴリズム、パレートフロントの部分集合を求解する非厳密アルゴリズム、パレートフロントの近似解を求解する近似アルゴリズムをそれぞれ開発した。次に、動的環境における多目的分散制約最適化問題を定式化し、この問題を解く効率的なアルゴリズムを提案した。最後に、応用研究として、チーム編成問題及びナース・スケジューリング問題に本モデルを適用した。本研究は、申請書に記載した研究計画どおりに進めることが出来、AI分野の最難関国際会議に複数の論文を輩出している。

研究成果の概要(英文)：In this research, the framework of a dynamic multi-objective distributed constraint optimization problem has been investigated. First, several efficient algorithms have been developed for solving a multi-objective distributed constraint optimization problem, namely (i) a complete algorithm which can guarantee to find all Pareto optimal solutions (called Pareto front), (ii) an incomplete algorithm that finds a subset of Pareto front, i.e., the obtained solutions can guarantee Pareto optimality, and (iii) an approximation algorithm. Next, a formal framework for a dynamic multi-objective distributed constraint optimization problem is defined and an efficient algorithm is also proposed. Finally, as an application domain, we apply our results to a team formation problem and a nurse-scheduling problem. In summary, this research can be executed according to the research plan described in my proposal. Also, several articles about this research have been accepted in the top conferences for AI.

研究分野：マルチエージェントシステム

キーワード：分散制約最適化 多目的分散制約最適化 パレート最適性

1. 研究開始当初の背景

(1) マルチエージェントシステムとは、エージェントと呼ばれる複数の自律的な主体(例えば、国、自治体、知的なプログラムや人間等)の相互作用に関する研究分野であり、計算機科学、人工知能、経済学、生物学、社会学等の分野も関連する学際的な研究分野である。インターネット、コンピュータシステムの高度化に従い、超並列、分散環境における計算や知的処理のモデル/理論が求められている。このような場では、従来の単一主体としてのプログラムモジュール群による制御は事実上不可能であり、多くの比較的独立したプログラム単位が相互作用する、マルチエージェントシステムによるシステムの設計が必要となる。マルチエージェントシステムを支える基礎理論に、人工知能の基礎理論である探索/制約最適化に基づく、分散制約最適化と呼ばれるアプローチがある。

(2) 実世界に存在する様々な最適化問題では、異なる評価基準を同時に考慮する場合が存在する。多目的分散制約最適化問題は、異なる評価基準をもつ複数の目的関数が存在する分散制約最適化問題である。多目的分散制約最適化問題では、一般には、複数の異なる目的関数間にトレードオフの関係が存在するため、すべての目的関数を同時に最適化するような割当は存在しない。単一目的の分散制約最適化問題から多目的への拡張は自然な流れではあるが、多目的分散制約最適化問題に関する既存研究は少ない。また刻一刻と変化する動的環境において、複数の評価基準を同時に考慮した動的な多目的分散制約最適化に関する研究はほとんど存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、動的環境における多目的分散制約最適化問題の定式化及び、この問題を解く効率的なアルゴリズムの開発を最終目標とした。実世界に存在する様々な最適化問題では、異なる評価基準を同時に考慮する場合が存在する。また、これらの多くは動的に変化する場合が多く、動的環境における異なる評価基準を考慮した最適化問題を考える必要がある。動的環境における分散制約最適化問題に関する既存研究はいくつか存在するが、多目的へと拡張した研究は存在しない。多目的及び、動的環境は実世界の最適化問題を解く上で重要なキーワードであり、本研究では、世界に先駆け、この2つのキーワードを同時に考慮した動的環境における多目的分散制約最適化問題の定式化及び、この問題を解く効率的なアルゴリズムの開発を行った。

3. 研究の方法

多目的分散制約最適化に関する以下の基礎研究及び、応用研究をそれぞれ実施した。

(1) 基礎研究1(多目的分散制約最適化アルゴリズムの開発): 単一目的の分散制約最適化問題から多目的への拡張は自然な流れで

はあるが、多目的分散制約最適化に関する既存研究は少ない。この問題では、最悪時におけるパレート最適解の個数が変数の数に対して指数のオーダーとなる。そのため、大規模な問題に対して、(i)パレートフロントのサブセットを求めるアルゴリズムの開発及び、(ii)比較的少ない計算で近似解を探索する近似アルゴリズムの開発が重要となる。そこで、本研究では、まず(i)に関して、すべての目的関数の最適値からなる利得ベクトル(ユートピア点と呼ぶ)を基準点とし、ユートピア点に最も近いパレート最適解、すなわち、パレートフロントのサブセットを求める高速なアルゴリズムを提案した。また、各評価基準間でバランスの取れたパレート最適解を求解するアルゴリズムや、代表的なパレート最適解を求解するアルゴリズムを開発した。次に、(ii)に関しては、既存の近似アルゴリズムを多目的分散制約最適化へと適用した高速な近似アルゴリズムを開発した。

(2) 基礎研究2(動的な多目的分散制約最適化問題の定式化及びアルゴリズムの開発): 多目的分散制約最適化に関する既存研究は少なく、この問題を動的環境へと拡張した研究は存在しない。基礎研究2では、世界に先駆け、動的環境における多目的分散制約最適化の基礎研究を推進した。まず、動的な多目的分散制約最適化問題のフレームワークを定義した。既存の動的な分散制約最適化問題は、いくつかの分散制約最適化問題の系列により定義されている。本研究では、単一目的の動的な分散制約最適化問題におけるアプローチと同様の方法を用いて、動的な多目的分散制約最適化問題をいくつかの多目的分散制約最適化問題の系列により定義した。次に、基礎研究1のアルゴリズムを動的環境へと拡張し、動的な多目的分散制約最適化問題を解く効率的なアルゴリズムを開発した。

(3) 応用研究(チーム編成、ナース・リスケジューリング、時間割作成問題): マルチエージェントシステムにおける重要課題の1つであるチーム編成問題にロバスト性を考慮したロバストなチーム編成問題を多目的制約最適化問題として定式化し、この問題を解くアルゴリズムを開発した。チーム編成問題とは、異なるスキルをもつエージェントの集合から、与えられたタスク集合を達成するような部分集合(チーム)を決定する問題である。ロバストなチーム編成問題において、あるチームがk-ロバストであるとは、チーム内から任意のk人を取り除いたとしても、残りのチームメンバーで、与えられたタスク集合が達成可能であることを意味する。さらに、この問題を動的環境へと拡張した動的チーム編成問題の定式化及び、この問題を解くアルゴリズムの開発も行った。また、多目的及び動的環境を同時に考慮したナース・リスケジューリング問題に関する研究に取り組んだ。ナース・スケジューリング問題とは看護師、勤務日、シフト等の集合に対して、与え

られた制約条件を満たすように勤務シフトを編成する組合せ最適化問題である。ナース・リスクジェーリング問題とは、看護師の急な欠勤により、既存の勤務シフトを再編成する動的なナース・スケジューリング問題である。本研究では、修正後の勤務シフトに対する最適性及び安定性を同時に考慮した多目的ナース・リスクジェーリング問題を定式化し、新しい解の評価基準として、勤務割当変更に対する看護師間の平等性を定義した。その他にも、OR分野の基礎研究である時間割作成問題にも着手し、複数の評価基準を同時に考慮した時間割作成問題の研究を行った。

4. 研究成果

(1) 初年度の研究成果：基礎研究 1 を中心に研究を進め、主に多目的分散制約最適化アルゴリズムに関する研究を行った。実世界に存在する様々な最適化問題では、異なる評価基準を同時に考慮する場合が存在する。単一目的の分散制約最適化問題から多目的への拡張は自然な流れではあるが、多目的分散制約最適化に関する既存研究は少ない。また、多目的最適化問題では、最悪時におけるパレート最適解（トレードオフな解）の個数が変数の数に対して指数のオーダーになるため、近似アルゴリズムや、パレートフロントの部分集合を求解するアルゴリズムが重要となる。既存研究では、B-MOMS と呼ばれる近似アルゴリズムが最初、かつ、唯一の多目的分散制約最適化アルゴリズムであった。本研究では、B-MOMS より、高速かつ、より多くのパレート最適解が求解可能な近似アルゴリズムの開発に成功した。また、パレートフロントの部分集合を求解するアプローチに関しては、世界に先駆け、本研究が最初に着手した。多目的制約最適化問題及び、多目的分散制約最適化問題において、目的関数間の最適性だけでなく、公平性、安定性、多様性等の解概念を導入し、多目的分散制約最適化問題における新しい解概念として定義した。また、これらの評価基準を基にパレートフロントの部分集合を求解するアルゴリズムの開発も行った。近似アルゴリズムに関する研究成果は、エージェントの応用分野の国際会議である the 17th International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems に論文が採録された。また、パレートフロントの部分集合を求解するアルゴリズムの研究成果は、マルチエージェント分野の最難関国際会議 the 13th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 知識表現分野の最難関国際会議 the 15th International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, 人工知能分野のツールに関する国際会議 the IEEE 26th International Conference on Tools with Artificial Intelligence 等に論文が複数採録されている。本研究成果の新規性は非常に

高く、国内外に与えるインパクトは大きい。

(2) 次年度の研究成果：基礎研究 2 及び、応用研究に取り組んだ。多目的分散制約最適化に関する既存研究は少なく、この問題を動的環境へと拡張した研究は存在しない。基礎研究 2 では、世界に先駆け、動的環境における多目的分散制約最適化の基礎研究を行った。また、応用研究として、マルチエージェントシステムにおける重要課題の 1 つであるチーム編成問題にロバスト性を考慮したロバストなチーム編成問題に着手した。具体的には、ロバストなチーム編成問題を多目的制約最適化問題として定式化し、この問題を解く効率的なアルゴリズムを開発した。さらに、この問題を動的環境へと拡張した動的なチーム編成問題の定式化及び、この問題を解くアルゴリズムの開発も行った。前者の研究に関しては、人工知能分野の国際会議 the 7th/8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence に論文が採録されている。後者に関しては、マルチエージェントシステムに関する最難関国際会議 the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems 及び、人工知能分野における最も権威のある国際会議 the 25th International Joint Conference on Artificial Intelligence に論文が採録された。また、動的なチーム編成に関する研究成果に関しては、the 16th International Symposium on Advanced Intelligent Systems において、Best Presentation Award と、Best Session Paper Award を受賞している。さらに、国内でも第 31 回合同エージェントワークショップ&シンポジウムにて、優秀論文賞を受賞している。

(3) 最終年度の研究成果：主に、応用研究として、ナース・リスクジェーリング問題と時間割作成問題の研究に取り組んだ。まず、多目的及び、動的環境を同時に考慮したナース・リスクジェーリング問題に関する研究に取り組んだ。ナース・スケジューリング問題とは看護師、勤務日、シフト等の集合に対して、与えられた制約条件を満たすように勤務シフトを編成する組合せ最適化問題である。ナース・リスクジェーリング問題とは、看護師の急な欠勤により、既存の勤務シフトを再編成する動的なナース・スケジューリング問題である。本研究では、修正後の勤務シフトに対する最適性及び安定性を同時に考慮した多目的ナース・リスクジェーリング問題を定式化し、新しい解の評価基準として、勤務割当変更に対する看護師間の平等性を定義した。また、時間割作成問題にも取り組み、複数の評価基準を同時に考慮した時間割作成問題に着手した。これらの研究成果は、チームテーブリングの国際会議 the 11th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling や、国際ジャーナル論文 Springer (Multi-agent and Complex Systems) に論文が採録された。

最後に、本研究テーマのキーワードである、動的環境（ダイナミクス）や多目的は、計算機科学や人工知能分野だけでなく、多方面にわたる研究分野で現在最も着目されているキーワードである。本研究が国内外に与えるインパクトは非常に大きく、特に、マルチエージェントシステム分野や、オペレーションズ・リサーチ分野に与えた影響は大きいと考える。今後は、災害等の研究に、本研究成果を適用し、社会学分野の研究者と共同研究を進めて行きたいと考えている。

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 5 件）

(1) Dong-Gyun Kim, Katsutoshi Hirayama, Tenda Okimoto, Distributed Stochastic Search Algorithm for Multi-ship Encounter Situations, Journal of Navigation, 査読有, 2017, <https://doi.org/10.1017/S037346331700008X>

(2) Tenda Okimoto, Tony Ribeiro, Damien Bouchabou, Katsumi Inoue, Mission Oriented Robust Multi-Team Formation and its Application to Robot Rescue Simulation, In proceedings of the 25th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 査読有, 2016, pp.454-460, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=3060621.3060685>

(3) Shih-Min Wu, Tenda Okimoto, Katsutoshi Hirayama, Katsumi Inoue, Multi-objective Nurse Rostering Problem, Springer Singapore, 査読有, 2016, pp.139-152, 10.1007/978-981-10-2564-8_10

(4) Maxime Clement, Tenda Okimoto, Katsumi Inoue, Mutsunori Banbara, Σx -Optimal Solutions in Highly Symmetric Multi-Objective Timetabling Problems, In proceedings of the 11th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling, 査読有, 2016, pp.63-79, http://www.patatconference.org/patat2016/files/proceedings/paper_8.pdf

(5) Tenda Okimoto, Nicolas Schwind, Maxime Clement, Tony Ribeiro, Katsumi Inoue, Pierre Marquis, How to Form a Task-Oriented Robust Team, In proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 査読有, 2015, pp.395-403, <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2772879.2772931>

〔学会発表〕（計 5 件）

(1) Tenda Okimoto, Mission Oriented Robust Multi-Team Formation and its Application

to Robot Rescue Simulation, the 11th International Conference on Practice and Theory of Automated Timetabling, 2016.8.26, ウーディネ（イタリア）

(2) Tenda Okimoto, Mission Oriented Robust Multi-Team Formation and its Application to Robot Rescue Simulation, the 25th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 2016.7.13, ニューヨーク（アメリカ）

(3) Tenda Okimoto, Skill-Based Dynamic Team Formation Problem, the 16th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 2015.11.6, 木浦（韓国）

(4) Tenda Okimoto, How to Form a Task-Oriented Robust Team, 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2015.5.6, イスタンブール（トルコ）

(5) Shih-Min Wu, Multi-Objective Nurse Rostering Problem, International Joint Agent Workshop and Symposium, 2015.10.1, 山中温泉河鹿荘ロイヤルホテル（石川県）

〔その他〕

ホームページ等：

神戸大学海事科学研究科

<<http://www.maritime.kobe-u.ac.jp/professors/okimoto.html>>

Research map

<<http://researchmap.jp/tenda/>>

個人のホームページ

<https://tendaokimoto.jimdo.com>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

沖本 天太 (Okimoto Tenda)

神戸大学大学院海事科学研究科・准教授

研究者番号：10632432

(3) 連携研究者

井上 克巳 (Inoue Katsumi)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授

研究者番号：10252321