

氏名	劉 <sup>リュウ</sup> 遠 <sup>エン</sup>
学位(専攻分野)	博士(工学)
学位記番号	工博第2916号
学位授与の日付	平成20年3月24日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	工学研究科機械理工学専攻
学位論文題目	Studies on Designing Distributed and Cooperative Systems for Solving Constraint Satisfaction Problems of Container Loading (コンテナ積付の制約充足問題の解決のための分散協調システムの設計に関する研究)
論文調査委員	(主査) 教授 榎木哲夫 教授 吉村允孝 教授 松原 厚

### 論文内容の要旨

本論文は、複数の目的と諸制約を満足する解を見いだす制約充足問題である「コンテナ積付問題」の解法について研究したものである。物流システムの最適化は、多目的性と多数の制約条件の存在と変動する環境のために、実用的な時間内での解決が困難な大規模複雑問題である。本論文では、供給連鎖管理の「制約理論」の考え方を取り入れたマルチエージェント系最適化アルゴリズムと、熟練者の暗黙的な知識をシステム内に明示的な知識として抽出するための対話型機械学習システムに関する内容で構成され、5章からなる。

第1章は序論であり、研究の背景、論文の目的および構成を述べている。

第2章は、本論文テーマの関連研究と従来手法についてまとめている。とくに、コンテナ積付問題について、従来の最適化手法による解法について述べ、その多くが、現場で考慮すべき制約条件の内容・規模ともに十分応えられるものではないことから、現場における熟練者によって行われている制約の柔軟な取り扱いを可能にするマルチエージェント系最適化アルゴリズムの必要性についてまとめている。

第3章では、Theory of Constraints-based Management (TOCM) として、「コンテナ積付問題」をマルチエージェントシステムとしてモデル化している。ここでは2段階でのマルチエージェントシステムとして構成し、1段階目は、コンテナへの積載単位となる各モジュール(パレット)をエージェントと見なし、コンテナ内部での積載空間をエージェントの資源とするモデル化を行っている。続く2段階目は、各コンテナをエージェントと見なし、第1段階で構成したモジュール群をエージェントの資源とみなす。そして、エージェント間で資源を譲渡したり交換したりすることによってシステム内での資源の分布状態の調節を繰り返し、制約条件を満足する最適解を探索する。そのために、供給連鎖管理(サプライチェーンマネジメント)のための制約理論(Theory of Constraints, TOC)で提案されているDrum-Buffer-Rope (DBR)の管理手法に基づいて、マルチエージェント系における個体(エージェント)間での交渉の進め方を動的に管理するための手法を提案している。問題の制約群を緩和不可能な「ハード制約」と緩和可能な「ソフト制約」に分類し、エージェント相互の間の分散協調的な交渉により、各個体が競争と協調を繰り返しながら漸次解を改善していく過程をアルゴリズムとして設計し、さまざまな複雑さの積み付け問題に対して本アルゴリズムを適用し、従来手法により得られる解から、より制約充足度の高い解を求められることを実証している。

第4章では、エージェントの競争と協調の意思決定を、より組織的かつ有効に行うための管理手法として、Three-Zone Buffer Management (TZBM) の概念を新規に提案している。各エージェントは、その制約充足状況に応じて、3種類のバッファのいずれかに割当てられて管理され、エージェント同士の協調交渉によって、自身の評価関数値の競争的向上と全体のための譲歩のトレードオフを適宜判断し、全体最適に近い解を、任意に許容される計算時間内に準最適解を見いだすことができる。ここではある程度の範囲内で緩和することが許されるソフト制約に着目し、解探索の過程において、これらの

制約をどれ程充足しているかによって、エージェントは3つのゾーンのいずれかに振り分けられる。すなわち、緩和しなくても制約を満足できているエージェントは緑ゾーンに、最大限に緩和しても制約を満足できないエージェントは赤ゾーンに、それ以外のエージェントは黄ゾーンに分類される。赤ゾーンに振り分けられたエージェントは最適化のボトルネックと見なすことができる。この状態を解消するために、上述の「制約理論」を利用する。すなわち、赤ゾーンに振り分けられたエージェントがマネージャとなって、他のゾーンに振り分けられているエージェント（コントラクタ）に対して資源配分について譲歩を打診する交渉を実行する。これを受けたコントラクタのエージェントは、現状での制約充足状態で決定される自身の評価関数値の競争的向上と、全体のための譲歩のトレードオフをローカルに適宜判断し、両者間で交渉が成立すれば、マネージャのエージェントに余剰資源を提供する。この結果、ボトルネックとなっていたエージェントは赤ゾーンから黄もしくは緑のゾーンに移行する。いずれのコントラクタとの間での交渉も成立せず、赤ゾーンに分類されたエージェントを解消できない場合には、ソフト制約を段階的に緩和する。これにより解探索の問題空間が変更され、デッドロック状態に陥っているエージェントによる交渉実行が再試行され、その結果に基づいて、エージェントの振り分け状態が更新される。エージェント間の交渉とソフト制約の緩和は、ソフト制約が緩和限界に達するか、あるいは赤ゾーンが空になるまで繰り返される。以上の特徴を有する提案アルゴリズムは、人間熟練者のように解探索の状況に応じて制約を適宜緩和していくことで、制約群を最大限に満足させられる解を短時間で探索することができる。また一括で制約を緩和して解法する場合に陥る局所解への拘留を回避することができる。論文では、従来法の局所探索とタブー探索の手法との比較において、提案アルゴリズムの有効性を実証している。本提案手法は積付問題のみならず、生産スケジューリングや経路計画、予約システムなどの幅広い領域に応用することができる手法となっている。

第5章では、Interaction-based Knowledge Acquiring Framework (IKAF) という対話型の機械学習方法を提案している。前章のアルゴリズムでは、積載現場の状況に固有な経験知に基づいて、各変数の緩和範囲を設定する必要があるが、このような知識を言葉で表現して抽出することは難しく、ヒューリスティック・ルールとして最適化アルゴリズムに設計者が直接組み込むには限界がある。提案システムでは、まず、前章までのマルチエージェント系最適化手法や、従来手法によって導出されたコンテナ積載結果の集合が、システムのユーザとなる人間熟練者に対して提示される。熟練者は、提示された積載結果の一つを評価し、この結果に対して不適切な積載箇所をインタフェース上で修正する。次に、この人間熟練者が加えた解の修正操作の実行履歴が、システムに入力される。システムは、「説明に基づく学習」(Explanation-Based Learning: EBL) のモデルを使用して、熟練者により実践された積載のためのメタルール、すなわち、どのような状況でいずれの制約の間の優先度合いをどのように設定すべきかについての経験則、を他の例題に対しても適用可能な一般化則として獲得する。そしてシステムは、この獲得された知識を教示対象となった以外の積載結果に対して適用し、修正を自動的に実行する。このようにシステムは、熟練者との最小限の対話を繰り返すことで、各問題の目的や制約条件に適した積載のための経験則を逐次獲得することができ、人間とコンピュータの双方の長所を融合した、現場指向の問題解決システムとして構築している。

第6章は結論であり、本論文で得られた第2章から第5章の成果を要約するとともに、残された課題と今後の展望についてまとめている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、複数の目的と諸制約を満足する解を見いだす制約充足問題である「コンテナ積付問題」について、マルチエージェントシステムによる解法アルゴリズムの提案と計算実験による有効性の検証、さらに人間と最適化アルゴリズムの対話による知識獲得手法について研究したもので、5章からなる。本論文で得られた主な成果は次のとおりである。

1. サプライチェーンマネジメントのための制約理論 (Theory of Constraints, TOC) で提案されているDrum-Buffer-Rope (DBR) の管理手法に基づいて、マルチエージェント系における個体 (エージェント) の競争と協調の意思決定モデルとして Theory of Constraint-based Management (TOCM) を提案している。積み付け対象となる複数のコンテナの各々を個体とするマルチエージェント系として定式化し、エージェント相互の間の分散協調的な交渉により、各個体が競争と協調を繰り返しながら漸次解を改善していく過程をアルゴリズムとして設計している。そしてさまざまな複

雑さの積み付け問題に対して本アルゴリズムを適用し、本手法の有効性を実証している。

2. エージェントの競争と協調の意思決定を、より組織的かつ有効に行うための管理手法として、Three-Zone Buffer Management (TZBM) の概念を新規に提案している。各エージェントは、その制約充足状況に応じて、Green-zone, Yellow-zone, Red-zone の Three-zone のいずれかに割当てられて管理され、エージェント同士の協調交渉によって、自身の評価関数値の競争的向上と全体のための譲歩のトレードオフを適宜判断し、全体最適に近い解を、任意に許容される計算時間内に見いだすことができる。従来法の局所探索とタブー探索の手法との比較において、提案アルゴリズムの有効性を実証している。
3. Interaction-based Knowledge Acquiring Framework (IKAF) という対話型の機械学習方法を提案している。前項のアルゴリズムでは、積載現場の状況に固有な経験知に基づいて、各変数の緩和範囲を設定する必要があるが、このような知識を言葉で表現させることは難しく、ヒューリスティック・ルールとして最適化アルゴリズムに設計者が直接組み込むには限界がある。提案システムでは、コンピュータが提示した最適化計算に基づいた積載結果に対して、人間熟練者が加えた解の修正操作の実行履歴が入力される。システムは演繹学習の手法を用いて、熟練者により実践された積載のためのメタルール、すなわち、どのような状況で制約条件の間の優先度合いをどのように設定すべきかについての経験則、を他の例題に対しても適用可能な一般化則として獲得する。これにより、高速な計算能力と膨大な記憶容量というコンピュータの長所と、柔軟な問題解決能力を有する人間の長所を融合した、現場指向の問題解決システムとして構築している。

以上のように本論文は、コンテナ積載問題を制約充足問題として捉え、その解法のためのアルゴリズムの提案と計算実験による有効性の検証、さらに人間と最適化アルゴリズムの対話による知識獲得手法を提案したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年2月27日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。