

Improvements of SAT Solving Techniques and Their Application to the Coalition Structure Generation Problem

査, 澳龍

<https://hdl.handle.net/2324/1959138>

出版情報 : Kyushu University, 2018, 博士 (情報科学) , 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : ZHA AOLONG 查 澳龍

論 文 名 : Improvements of SAT Solving Techniques and Their Application to
the Coalition Structure Generation Problem
(SAT 技術の改善とその提携構造形成問題への応用)

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

充足可能性問題 (Boolean Satisfiability Problem: SAT 問題) とは、与えられた命題論理式の充足可能性を判定する問題であり、最初に NP 完全性が証明された問題である。回路検証やネットワーク検証、スケジューリング問題、制約充足問題などの人工知能や計算機科学における様々な問題が SAT に還元可能である。それ故に SAT 問題は古くから重要視され、研究されている。SAT 問題を解くためのプログラムを SAT ソルバーと呼び、前述の問題をより多く解けるようにするために SAT ソルバーの性能向上は重要なことである。さらに、本論文では SAT 問題の重要な拡張の一つとして、MaxSAT 問題について扱う。SAT 問題が与えられた命題論理式全体を充足するような変数割り当てを探すのに対して、MaxSAT 問題はできるだけ多くの命題論理式部分を満たすような最適解を求めることを目的としている。本論文は SAT ソルバー並びに MaxSAT ソルバーの効率化、及びその組合せ最適化問題への実践的応用を主目的としている。

本論文の第一の目的は SAT ソルバーの高速化である。SAT ソルバーにおける主要な技法として、単位伝搬と pure literal 削除がある。しかし、データ構造の故に pure literal の検出は単位節の検出より多くの時間がかかり、大方のソルバーは前処理でのみ pure literal 削除を行う。一方、探索中矛盾を発見した際、同じ矛盾を繰り返さないための失敗学習を行うことは最先端ソルバーの特徴である。既存手法は一回の矛盾につき一つの矛盾要因の学習を行うが、一般には、複数の矛盾要因を抽出することができる。本論文では、まず SAT ソルバーにおける pure literal 削除戦略、矛盾抽出規則、学習節管理に注目し、これらを効率的に用いる新しい手法を提案する。Pure literal 削除手法を実装した SAT ソルバーは、2016 年度の国際 SAT 競技会において上位の成績 (26 参加ソルバー中の第 7 位) を収めた。また、矛盾抽出の拡張に基づく学習強化手法を実装した SAT ソルバーは、2018 年度の国際 SAT 競技会で準優勝した (10 参加ソルバー中の第 2 位)。

次に本論文では、重み付き部分 MaxSAT 問題を解く際に用いられる、制約符号化の既存手法の一つである基数制約符号化の改良を行うことにより、MaxSAT ソルバーの性能向上を図る。既存手法は符号化された式の膨大なサイズに起因する記憶量爆発、及び実行の非効率化を被る。提案した modular 計算に基づく混合基数制約符号化は従来手法と比べて、付加される変数や節の数を大幅に削減し、MaxSAT ソルバーの国際競技会で用いられるベンチマーク問題の正解数を著しく増加させることに成功した。また、提案手法の付加変数や付加節数は常に入力変数の数に関して多項式サイズであることが証明されている。提案手法を実装したソルバーは 2017 年度の国際 MaxSAT 競技会において上位の成績 (10 参加ソルバー中の第 2 位) を収めた。

本論文の三つ目の貢献として、MaxSAT ソルバーの有効な応用事例の一つについて述べる。それは協力ゲーム理論に関する分野である。自律的に行動するエージェントが複数存在するとき、全体

で一つのチーム（提携）として協力して行動するよりも複数のチームで行動した方がより良い場合がある。より具体的には、提携の利得（提携値）の総和が最大となるようにエージェントの集合を分割する問題であり、これを提携構造形成問題と呼ぶ。分割決定木で記述された分割関数ゲームにおける提携構造形成問題を効率的に解く手法が既に提案されているが、それは深さ優先探索に基づく分枝限定法を用いたアルゴリズムである。これに対し、本論文は、提携構造形成問題を **MaxSAT** 符号化し、**MaxSAT** ソルバーを用いて解く手法を提示する。計算機実験によれば、既存手法は提携値が正のみの時に効率的に動作するのに対し、本論文の手法では負の提携値が存在する時に効率的に動作することが明らかとなった。また、実行時間の観点で、本手法では既存手法に比べて全体のインスタンスに対しての実行時間の標準偏差が小さいことが示された。

以上、本論文の貢献について要約すると、(1) **SAT** ソルバーの高速化、(2) 基数制約符号化に基づく **MaxSAT** ソルバーの効率化、(3) **MaxSAT** ソルバーを用いた提携構造形成問題の高速解法、計 3 つのテーマに関する独自の手法の提案及び実証である。