

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：13501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330248

研究課題名(和文) 充足可能性判定器の高速化に関する研究

研究課題名(英文) A Study of Accelerating Boolean Satisfiability Solvers

研究代表者

鍋島 英知 (NABESHIMA, Hidetomo)

山梨大学・総合研究部・准教授

研究者番号：10334848

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：命題論理の充足可能性問題を解くSATソルバーは、困難な組み合わせ問題を解くための重要な基盤であり、システム検証やスケジューリングなどの様々な分野に応用されている。本研究では、SATソルバーの高速化を目的として、求解中に動的に問題を単純化する手法や、頑健なヒューリスティクスの構築、並列解法などについて研究開発を行い、これらの手法を用いることで従来手法よりも高速に求解できることを実証した。

研究成果の概要(英文)：A SAT solver that determines satisfiability of a given propositional formula is a key technique to solve hard combinatorial instances, and is used in various fields such as system verification and scheduling. The purpose of this research project is performance improvement of SAT solvers. We studied and developed lightweight simplification techniques that are applied during solving, robust heuristics for restarts and clause database reductions, parallel solving and so on. We have achieved the performance improvement by using these techniques compared with previous work.

研究分野：人工知能基礎

キーワード：充足可能性判定問題 SATソルバー

1. 研究開始当初の背景

(1) **SAT 技術の普及**: 命題論理の充足可能性判定問題である SAT 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もある。SAT は人工知能および計算機工学における最も基本的な問題として、論理合成、システム検証、プランニング問題、スケジューリング問題、制約充足問題、制約最適化問題、定理証明などさまざまな分野に応用されている。この背景には、最近の十数年で SAT ソルバーの性能が飛躍的に向上したことが要因に挙げられる。具体的には、探索過程で矛盾が発生した際にその原因を解析・記録することで同様の矛盾の発生を防ぐ節学習とそれに基づくバックジャンプ法や、監視リテラルによる高速な単位伝播、優れた変数選択ヒューリスティックスの開発、変数の選択順序による影響を緩和するためのリスタート戦略、学習節の取捨選択を行うための優れた評価尺度の開発などにより、ソルバーの性能は継続的に向上してきた。

(2) **SAT ソルバーの高速化の重要性**: SAT ソルバーの性能向上を契機に、その種々の発展形についても盛んに研究が進められている。それらの手法においては、しばしば SAT ソルバーが基本推論エンジンとして利用されるため、SAT ソルバーの性能向上は必要不可欠である。例えば、複数の CPU、PC を利用してソルバーの求解能力の向上を図る並列 SAT ソルバーに関する研究が活発に行われているが、現在主流の手法は、複数の異なる逐次型 SAT ソルバーに同一の問題を並列に解かせるポートフォリオ型の並列ソルバーである。ソルバー間で学習節共有などの情報交換を行うものの、基本的には、得意な問題群が異なるソルバーを並列に走らせることで安定的に性能改善を図る手法である。この戦略はその基盤となる逐次ソルバーの性能に依存しており、逐次ソルバーの性能向上に関する研究が必要不可欠である。

また、問題記述言語としての SAT を拡張する研究も盛んに行われている。SAT ソルバーは、通常、連言標準形(conjunctive normal form; CNF)の命題論理式を入力として受け取り、その充足可能性を判定する。CNF 式は、その平易な構造から SAT ソルバーにとって扱いやすく、種々の効率化技術の基盤となっており、問題記述言語としても幅広く利用される有用な形式ではあるが、一方でその簡潔さはしばしば巨大な SAT 問題を生む要因となる。そのため、問題記述言語を拡張した、擬似ブール(Pseudo-Boolean)制約ソルバーや、限量ブール式(Quantified Boolean Formula; QBF)ソルバー、背景理論付き SAT(Satisfiability Modulo Theories; SMT)ソルバー等に関する研究も活発に進められている。これらの研究の多くでは、SAT ソルバーが基本推論エンジンとして呼び出され

るため、やはりその性能向上は重要となる。しかし、ここ数年、ソルバーの性能の向上は比較的緩やかになってきており、さらなる性能向上のためにブレイクスルーが求められている。

2. 研究の目的

SAT ソルバーは、システム検証をはじめとする様々な分野に応用され、また SAT を拡張した問題における基本推論エンジンとしても幅広く利用されており、困難な組み合わせ問題を解くための重要な基盤となっている。本研究では、求解中に問題を動的に単純化する手法の拡張や、ソルバー内部で使われている様々なヒューリスティックスの改善、拡張融合法や並列処理について検討することで SAT ソルバーの求解性能を向上させることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) **軽量動的単純化手法の拡張**: 求解中に SAT 問題から冗長性を取り除く動的単純化は、求解中に得られた情報も利用できるため、前処理として実行される静的単純化よりも効果的な場合がある。しかし求解中に実行するため単純化にかかるコストを抑える必要がある。我々は、単純化コストをほぼ無視できる非常に軽量の動的単純化手法を提案している(引用文献)。本研究ではこの手法を発展させ、より単純化の効果が得られる手法について検討する。

(2) **ヒューリスティックスに関する研究**: SAT ソルバーでは変数選択やリスタート、学習節の削減戦略などに多数のヒューリスティックスが利用されており、最新 SAT ソルバーの性能を支える要素技術の 1 つになっている。これらのヒューリスティックスについて、その精錬化や多様な問題群に対応するための頑健性の向上手法について検討する。

(3) **拡張融合法に関する研究**: 現在主流の SAT ソルバーは矛盾からの節学習(CDCL)に基づいている。CDCL ソルバーは融合法と等価な証明能力を持つことが知られているが、より強力な拡張融合法に基づく手法が次世代のソルバーの基盤として期待されている。拡張融合法は、融合法に拡張規則を追加した枠組みであり、これが証明の短縮に寄与する。一方で、拡張規則の無制限な適用は節や変数の増大をもたらすため、適切な条件付けが必要不可欠である。本研究では、拡張規則の適切な適用条件について検討する。

(4) **並列 SAT ソルバーに関する研究**: 並列 SAT ソルバーには、複数の異なる逐次型 SAT ソルバーを並列に実行させて競争的に問題を解くポートフォリオ型と、探索空間を分割してそれぞれを並列に協調しながら解く探索空間分割型の手法がある。これらの手法にはそれぞれ一長一短があり、両者の利点を備えた並列手法について検討する。

<引用文献>

H. Nabeshima, K. Iwanuma, K. Inoue, On-The-Fly Lazy Clause Simplification based on Binary Resolvents, IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2013), 2013, 987-995.

4. 研究成果

(1) **軽量動的単純化手法の拡張**: 単位伝搬処理から抽出したバイナリ節を基に, 真偽値の同定や等価リテラルを検出する動的単純化手法を拡張した. 具体的には, 命題変数の真偽値を求解中に同定する手法をバイナリ節同士の自己包摂融合の観点から再定式化し, 従来手法よりも網羅的に検出可能な手法や, 求解中に走査する節とバイナリ節群との融合節を求め, 変数の真偽値や等価リテラルを検出する手法, 基数制約を動的に検出し単純化に用いる手法などを提案した. 評価実験の結果, 特に充足不能な問題群に対して性能向上が得られることを実証した.

(2) **ヒューリスティクスに関する研究**: 学習節の評価尺度として多くのソルバーで用いられているリテラルブロック距離(LBD)は, 充足不能な問題の求解性能向上に効果のある有用な尺度であるが, リテラルブロックのサイズが小さくなる問題においては, LBDに基づくリスタート戦略が適切にリスタートを促せない場合があることを実験的に示し, 動的にリスタート戦略を選択することで大きな性能向上が達成できることを示した. また, LBDに基づく学習節の保持戦略について網羅的に評価し, 単位伝搬や矛盾のカバー率に基づく新たな保持戦略を提案し, 従来手法よりも高い精度・再現率が得られること, それにより求解数・速度の向上が達成できることを実証した.

(3) **拡張融合法に関する研究**: 拡張融合法によって証明の短縮が可能な場合について検討し, あるリテラルを含意するリテラル群が頻出する場合に, 拡張規則によりそのリテラル群に別名を与える手法を考案した. リテラル間の含意関係は単位伝搬処理から高速に抽出可能であり, また頻度計算では近似計数手法を用いることでメモリ使用量を抑えることが可能である. 現状では性能向上を達成できていないが, ここで開発した軽量な特徴抽出技術は拡張融合法を実現するための要素技術として利用できると考えられる.

(4) **並列 SAT ソルバーに関する研究**: 効率的な並列 SAT ソルバー開発の基盤構築のため, 学習節の決定的交換プロトコルについて検討を行った. 従来の矛盾回数などの尺度を利用して同期を取る手法では, 各プロセスの推論速度が細かく変化する場合に同期待ち時間が多く発生することを示し, 通信に一定の遅延を認めることで待ち時間の削減を図る手法を提案・検討した. またポートフォリオ型ソルバーにおいて, 与えられた SAT 問題

に対して深層学習により適したソルバーを選択する手法について改善を図り, SAT に特化した前処理を施すことで性能改善が達成できることを実証した. これらの技術は探索空間分割型・ポートフォリオ型の並列ソルバー開発のための基盤技術として利用できる.

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)

迫龍哉, 宋剛秀, 番原睦則, 田村直之, 鍋島英知, 井上克巳, インクリメンタル SAT 解法ライブラリとその応用, コンピュータソフトウェア, 査読有, Vol.33・4, 2016, 16-29, DOI:

http://doi.org/10.11309/jssst.33.4_16

Adrien Rougny, Yoshitaka Yamamoto, Hidetomo Nabeshima, Gauvain Bourgne, Anne Poupon, Katsumi Inoue, Christine Froidevaux, Completing Signaling Networks by Abductive Reasoning with Perturbation Experiments, Late Breaking Papers of the 25th International Conference (ILP 2015), CEUR Workshop Proceedings, 査読有, Vol.1636, 2016, 95-100.

Masahiko Sakai, Hidetomo Nabeshima, Construction of an ROBDD for a PB-constraint in band form and related techniques for PB-solvers, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems, 査読有, E98-D, 2015, 1121-1127, DOI: <http://doi.org/10.1587/transinf.2014FOP0007>

[学会発表](計13件)

藤江柁輔, 鍋島英知, ポートフォリオ型 SAT ソルバーのための分類器の構築手法, 人工知能学会第 103 回人工知能基本問題研究会, 2017 年 3 月 13 日, 湯布院公民館(大分県).

藤井樹, 伊藤靖展, 鍋島英知, 同順位を含む研究室配属問題の CSP ソルバーによる解法の検討, 人工知能学会第 103 回人工知能基本問題研究会, 2017 年 3 月 13 日, 湯布院公民館(大分県).

鍋島英知, SAT ソルバーの最近の技術動向, 第 30 回人工知能学会全国大会, 2016 年 6 月 6 日, 北九州国際会議場(大分県) **(招待講演)**.

迫龍哉, 川原征大, 宋剛秀, 番原睦則, 田村直之, 鍋島英知, SAT 型制約ソルバーによるナンバーリンクの解法とその評価, 第 30 回人工知能学会全国大会, 2016 年 6 月 6 日, 北九州国際会議場(大分県). 後藤優也, 鍋島英知, CDCL ソルバーにおける ZDD を利用した節圧縮表現の導入,

第 30 回人工知能学会全国大会,2016 年 6 月 6 日,北九州国際会議場(大分県).

田村直之,井上克巳,鍋島英知,番原睦則,宋剛秀,クラウド上のソフトウェア要素最適配置問題の解法,第 100 回人工知能基本問題研究会,2016 年 3 月 27 日,熊本市民会館(熊本県).

三神直彬,鍋島英知,SAT ソルバーの安定性向上のための粗な初期探索手法の検討と提案,第 29 回人工知能学会全国大会,2015 年 5 月 31 日,公立ほこだて未来大学(北海道).

杉本拓也,鍋島英知,CDCL ソルバーのための軽量動的簡単化手法,第 97 回人工知能学会人工知能基本問題研究会,2015 年 3 月 22 日,別府国際コンベンションセンター(大分県).

横前菜々子,鍋島英知,CDCL ソルバーにおける学習節の深さに基づく節管理戦略,第 97 回人工知能学会人工知能基本問題研究会,2015 年 3 月 22 日,別府国際コンベンションセンター(大分県).

渡辺大樹,鍋島英知,SAT 変換手法における充足不能コアの抽出,第 97 回人工知能学会人工知能基本問題研究会,2015 年 3 月 22 日,別府国際コンベンションセンター(大分県).

田村直之,宋剛秀,番原睦則,鍋島英知,SAT 型制約ソルバーを用いたナンバーリンクの解法,情報処理学会 DA シンポジウム 2014,2014 年 8 月 29 日,水明館(岐阜県)(**情報処理学会 SLDM 研究会優秀論文賞**).

杉本拓也,鍋島英知,CDCL ソルバーのための軽量動的包摂検査,第 28 回人工知能学会全国大会,2014 年 5 月 12 日,ひめぎんホール(愛媛県).

三神直彬,鍋島英知,大規模 SAT 問題の求解のための緩和解決法の検討と提案,第 28 回人工知能学会全国大会,2014 年 5 月 12 日,ひめぎんホール(愛媛県).

[その他]

ホームページ等

SAT ソルバー GlueMiniSat

<http://glueminisat.nabelab.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鍋島 英知 (NABESHIMA, Hidetomo)

山梨大学・大学院総合研究部・准教授

研究者番号: 10334848