

審査の結果の要旨

氏名 文性琇

本論文は「Widely Applicable Approaches to Adjust Intensity and Diversity for Constructing Efficient SAT Solvers (集中性と多様性を調整しSATソルバー性能向上を目指す広く適用可能なアプローチ)」と題し、SAT問題(Satisfiability problem, 充足可能性問題)のうち、「アプリケーション問題」と呼ばれる一群の問題を対象とし、問題に潜む「隠れた問題の構造」に着目、アプリケーション問題用SATソルバーの探索効率を上げることを目標として、探索の多様性と集中性のバランスを取る手法を提案を行い、既存の逐次および並列ソルバーへ適用、実装実験による検証を行ったもので、全八章から構成されている。ここでターゲットとする「アプリケーション問題」は、現実世界に実在する、例えば、プランニング、モデル検査、回路設計、ソフトウェア検証といったアプリケーションから導出された問題であり、SAT問題は、NP完全問題であるが、近年では数十万から数百万変数のアプリケーション問題が現実的な時間で解かれることも多い。

第一章「Introduction」では、SAT問題の説明、その中でも特に「アプリケーション問題」は特定の変数群間の依存関係が強く、biased structureを持つことを例示、アプリケーション問題の効率的な求解と探索の多様性と集中性の間の関係を説明している。そして、多様性と集中性に着目した3つの提案についての概要を紹介している。

第二章「Backgrounds」では、SAT問題やSATソルバーに関する基本概念を説明し、基本的な探索アルゴリズムである Davis-Putnam-Logemann-Loveland (DPLL) アルゴリズムを説明したうえで、近年、主流となっている Conflict Driven Clause Learning (CDCL) ソルバーの主要素技術であるプロパゲーション、クローズ学習、ブランチングヒューリスティクスの説明および現代の並列SATソルバーの主流となっているポートフォリオ型要素技術を説明した上で、これらの要素技術と探索における多様性と集中性の関係を述べている。

第三章「Diversification of search」では、変数順序をシャッフルする実験を行い、本博士論文全体において一つの核となる探索空間の多様性に関する観察結果を論じている。

第四章「New branching heuristic」では、探索の集中性に着目している。ブランチングヒューリスティクスは探索時にどの変数を優先させるかを定めるもので、SATソルバーの集中的探索を実現している。しかしながら優先度を正確に定めることは困難であ

るため、効率を考慮した粗い近似手法が用いられており、しばしば同じ優先度を持つ「Tie」状態が発生する。ここでは実際に「Tie」が起こる頻度が高いことを観察、余分なコストを抑えたまま優先度の精度を上げ効率の良い集中探索を実現する「Tie break」手法の提案を行い、一般に広く使われているソルバーのブランチングヒューリスティクスおよび、最近注目を集めつつある新たなブランチングヒューリスティクス双方に適用、有効性を示している。

第五章「Hybrid branching heuristic」では、SATソルバーの探索機能の多様性を確保するため、既存の多くのソルバーを束ねて用いるためのフレームワークを提案、このフレームワーク上でブランチングヒューリスティクスを扱うハイブリッドモデルを提案、複数のソルバーが持つ機能をSATソルバー単体として提供するため、単なる性能向上のみならず、SATソルバー研究の観点からも継続性という点で意義がある。さらに、このフレームワークを利用して、ソルバーの可読性を考慮しTie breakを適用したhybrid modelの提案、および Random forestを適用し、CNFからfeature extractionをして適したbranching heuristicを与えるモデルを提案、これらの有効性を確認している。

第六章「History map」は、並列SATソルバーにおいて、ノード間で情報共有するための新しいデータ構造を提案、様々なシナリオにおいて探索の多様性と集中性を調整可能としている。具体的には、共有する情報の量を減じ固定することで、ソルバーの性能に悪影響を及ぼさず、また時間経過による削除を行わず蓄積のみ行うという特徴を持つ Approximate history map (AHM) を提案している。また構築したAHMを用いてソルバーの多様性を確保する1つのシナリオとしてSparsely visited area walking on search space (SaSS) を提案、有効性を確認している。

第七章「Other proposals」では、SATソルバーの改善につながる可能性のあるいくつかの小さな提案をまとめている。具体的には、六章で用いられたSaSSの改良、アプリケーション問題の繰り返し構造を効率的に用いるためのresemble structure、学習の多様性を確保するためのreshuffling の提案について述べている。

第八章「Conclusions and future directions」では、本論文の研究成果をまとめ、今後の発展について述べている。

以上を要するに、本論文は 探索の多様性と集中性に着目、SATソルバーを効率化させるための提案を行い、それぞれの効果について評価を行った。これらの提案は、多くの既存のソルバーに対し適用可能である汎用的なものであるのみならず、提案者本人が実装したソルバーが世界的なコンペティション(SAT competition 2016)でゴールドメダルを獲得するなど、SAT業界において目に見える形での成果を上げており、今後のSATソルバー研究分野全体の発展に繋がる先駆的な貢献と認められ、情報理工学における創造的実践の観点で大きな価値が認められる。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。