

審査の結果の要旨

氏 名 菌部 知大

本論文は「SAT ソルバにおける効率的な探索の多様化を実現する統合的手法 (A Unified Approach for SAT Solvers to Achieve Efficient Diversification)」と題し、SAT (SATisfiability problem, 充足可能性問題)ソルバ の高速化を目的とし、問題の構造を利用し探索に多様性を持たせるための統一的枠組みを提案、逐次および並列ソルバへの実装実験による検証を行うもので、全八章から構成される。本研究における SAT ソルバの対象は、現実世界の問題から導出される「アプリケーション問題」で、数十万から数百万変数からなる **Conjunctive Normal Form (CNF, 乗法標準形)**を想定している。

第一章「はじめに」では、本論文がターゲットとする「アプリケーション問題」とよばれる一群の問題、たとえば、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現実の問題から導出される問題について、その「良い性質」、すなわち、変数間の依存関係が強く構造的であるという性質を利用することにより、探索の高速化が期待できること、そして SAT ソルバにおける「探索の多様性」の重要性について紹介している。

第二章「SAT 問題と SAT ソルバ」では、SAT 問題や SAT ソルバに関する基本概念を説明し、現行の殆どの SAT ソルバで利用されている基本的なアルゴリズムである **Davis-Putnam-Logemann-Loveland (DPLL)**、および **Conflict Driven Clause Learning (CDCL)** について説明したうえで、現在、並列 SAT ソルバの主流である **Portfolio 法**について概説している。

第三章「関連研究」では、本論文の着眼点となった、逐次ソルバにおける **Decision heuristics** と **Restart** に関する手法、および並列 SAT ソルバに採用されている手法について、その手法が適用された SAT ソルバと共に紹介し、系譜をたどっている。

第四章「SAT ソルバの内部動作の可視化と解析」では、SAT ソルバの理解と探索挙動の観察を目的として開発を行った SAT ソルバの内部動作可視化ツールを紹介し、いくつかの特徴的な観測結果を示している。この可視化ツールにより、特定の変数に対し偏った探索のみを行うため有効な学習が行えない状態に陥ることがしばしば見受けられることや、**implication graph** の中に「入次数」が多いノードが出現しやすい問題が存在することが観察され、次章以降の提案の端緒を開いている。

第五章「問題の構造に基づく入り口変数の転換を行う統合的手法」では、探索に多様性を与えるためのフレームワークとして、探索の初期に値を割り振る変数(探索の入り口とし

て選ぶ変数)の順番を、問題の構造を利用することで効果的に変更する **structure-based entry-variable diversion** を提案している。これは、探索の対象となる変数に変化をつけることで探索に多様性を与えることを目的として、探索開始時、および **restart** 時の変数の優先度づけを変更するための枠組みで、本研究では二種類の問題構造について、この枠組みの適用を行っている。

第六章「**Counter Implication Restart** の提案」(以後、**CIR** と記す)は、一つ目の適用であり、変数間の値割り当て関係を有向グラフとして表した **implication graph** を問題の構造として利用している。**restart** 直前の **implication graph** を走査し、「入次数の多いノード」すなわちそれまでの探索で比較的重要視されていなかった変数に優先度を付加することで、過去の探索を考慮した上で新たな空間への探索を行っている。本論文では **CIR** を逐次 **SAT** ソルバに実装を行い単体性能を評価、処理時間のかかる「難しい問題」に対して、**CIR** の有効性を確認している。また、ワーカー毎に異なる探索を行わせる **portfolio** 型の並列 **SAT** ソルバにも実装を行い、小規模並列 **SAT** ソルバにおける有効性も確認している。

第七章「大規模並列 **SAT** ソルバ向けの **diversification** の提案」では、二つ目の適応となる **block branching** の提案を行っている。ここでは、与えられた **CNF** の **binary clause** を問題の構造として着目、これらの **clause** から互いに関連の深い変数から成るブロックを抽出し、各ブロックを **portfolio** 型並列ソルバの各ワーカーに割り当て、ワーカーは割り当てられたブロックの変数に優先度を付加することで、全ワーカーが互いに関連の深い変数を優先して探索しつつ、全体としては、それぞれが可能な限り異なる空間の探索を行うことをめざしている。**block branching** はワーカー数の多い大規模並列環境において効果的な **diversification** を図ることができる手法であり、計算機実験の結果から並列環境における有効性を確認している。

第八章「まとめ」では、本論文の研究成果をまとめている。

以上を要するに、本論文は **SAT** ソルバの効率化のため、問題の持つ構造を利用し多様性を導出する統一的な手法を提案し、その効果についてさまざまな角度から評価を行った。本提案による多様性の実現は、超並列計算機における離散探索問題の並列化手法としてさらなる応用展開が期待される。また、提案手法の一つである **CIR** は、発表後1年という短期間のうちに複数の並列 **SAT** ソルバに採用されたことが確認されており、これは本提案手法が、単に性能面で優れているのみならず、他手法との親和性も高く実用的であることを示している。このように、本研究は 逐次および並列 **SAT** ソルバの高効率化に貢献し、短期間のうちにその研究成果が波及し、創造的実践の観点からも価値が大きいと認められる。

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。