

論文の内容の要旨

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

氏名 菌部 知大

(本文)

充足可能性問題(Propositional Satisfiability Problem, SAT 問題)とは、二値変数からなる論理式に対して、その式を充足する変数割り当ての有無を証明する問題である。その性質は古典的な NP 完全問題として知られており、充足解の求解を多項式時間以内に終わらせることが困難であると信じられている。問題の形式は **Conjunctive Normal Form (CNF, 乗法標準形)** であり、**clause** と呼ばれる論理式が論理積で連結されたものである。SAT 問題の生成方法は様々あり、その中でも、現実世界のアプリケーションから生成された問題はアプリケーション問題と呼ばれ、一般的に変数間の依存関係が強く、構造的(structured)な問題であることが知られている。近年の研究成果によって、このアプリケーションから派生した SAT 問題を解くソルバ(SAT ソルバ)の性能が飛躍的に向上し、現実世界の問題を扱える水準に達した。SAT ソルバは二分木に対する **backtrack** 探索を行い、**conflict** が生じた時に新たな **clause** を学習する **clause** 学習アルゴリズムが備わっている。また、SAT ソルバの並列化も進められており、近年は各ワーカーが競争的かつ強力的に探索を行う **portfolio** 戦略が主流となっている。

SAT ソルバは値を割り振る変数の選択によって、しばしば解の存在しない、また枝狩りを促進する役に立つ **clause** も学習できないような不毛な探索空間に陥ることがある。そのような空間に陥ると、**backtrack** だけでは脱却が困難になり、同一空間を長い時間探索することになる。それを防止するために、探索を最初からやり直す **restart** が近年の SAT ソルバに備わっている。一方で、様々な探索空間を場当たりに探索するだけでは効率的に解を発見することが難しく、互いに関連の深い変数群に対する集中的

な探索も必要であると考えられる。両者を適切に切り替える必要があるが、一般的に不毛な探索空間に停滞しているかどうかを検知することは困難である。

この問題に対して、本研究では探索空間の切り替えを積極的に行い、探索に多様性を持たせることを考える。ただし、単純にそれまで探索対象に選ばれていなかった変数を選択するような、無作為な方法による探索空間の転換ではなく、アプリケーション問題に内在する構造を利用した転換が重要である。単純な構造を持つ問題の場合は、たとえ変数が比較的多くても短い処理時間で解を発見できることが多いが、複雑な構造を持つ問題の場合、局所的な構造が絡み合っており、特定の構造のみに対する探索を行っては解を効率的に発見できないと考えられる。そのような一般的に解くのが困難な問題に対して、問題に内在する局所的な構造を可能な限り探索するために、探索に多様性をもたらすことが重要であると考えられる。本研究では、問題の構造を利用して、探索初期(入り口)における値を割り振る変数の順番を積極的に変更し、様々な空間への探索を促すことで不毛な探索空間への陥りを防ぎつつ、集中的に探索する変数を切り替え、探索に多様性を与えることを目的とする統合的手法 **structure-based entry-variable diversion** を提案する。

その実現方法の一つとして、**restart** 直前の探索状況から問題の構造を考慮して重要な変数群を見つけ出し、**restart** 後にそれらを優先的に値を割り振ることで探索空間の切り替えを効果的に行う **Counter Implication Restart (CIR)** を提案し、解くのが困難な問題に対して高速な処理を実現した。そして、探索に多様性を持たせることは逐次の **SAT** ソルバのみならず、各ワーカーが可能な限り異なる探索を行う必要がある **portfolio** 型の並列 **SAT** ソルバにおいても重要な役割を持ち、**CIR** は同様に高い効果を示した。さらに、より並列数の高い大規模環境において、各ワーカー間で探索空間の重複が顕著になる可能性が高いため、より強力な多様性を実現する **block branching** の提案を行う。**block branching** は変数間の強い関係を示す **binary clause** に着目し、それらから互いに関係の深い変数をまとめ、各ワーカーに集中的に探索を行わせる。それによって、問題に内在する局所的な構造を一斉に調べることが期待でき、全体として多様な空間にわたる探索が可能となる。**block branching** は解くのが困難な問題に対して有効性を示した。本研究の全ての提案手法は特定の **SAT** ソルバの実装に依存せず、近年の多くの **SAT** ソルバに適用が可能であり、探索効率を向上させることが可能である。