

特集「最近の SAT 技術の発展」にあたって

井上 克巳

(国立情報学研究所)

田村 直之

(神戸大学)

命題論理の充足可能性判定問題 (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。近年、 $10^6 \sim 10^7$ 個の変数をもつ大規模な SAT インスタンス (SAT 問題) を、非常に高速に解くことが可能な SAT ソルバーが実現され、これらの分野への実用的応用が急速に拡大している。

このように、与えられた問題を論理式で表現し SAT ソルバーを用いて解くことから、SAT 技術は現代の推論システムにおいて基盤的役割を果たしているといえる。本特集では、こうした SAT 技術の最近の動向を踏まえ、SAT ソルバー技術とその応用技術、また SAT を拡張・発展させた問題について、第一線の研究者による解説を行うことを目指した。このために本特集では、平成 20 ~ 23 年度科学研究費補助金基盤研究 (A) 「制約最適化問題の SAT 変換による解法とその並列分散処理に関する研究」(No. 20240003, 代表: 田村直之) に参加している研究者に執筆を依頼した。

本特集は 8 編の解説から構成されている。まず、井上・田村による「SAT ソルバーの基礎」では、SAT の基礎理論および DPLL を始めとする SAT 問題を解くための代表的なアルゴリズムについて解説し、この分野の研究動向について概観する。続く、鍋島氏と宋氏による「高速 SAT ソルバーの原理」では、最新の SAT ソルバーで用いられている技術について解説する。特に、高速 SAT ソルバーとしてよく使われている MiniSat で用いられている技術として、矛盾からの節学習、リテラル監視、リスタート、変数選択ヒューリスティックスについて解説する。

田村および番原氏と丹生氏による「制約最適化問題と SAT 符号化」では、グラフ彩色問題を例題として、制約充足問題に対する各種 SAT 符号化手法を解説し、各種符号化の違いと特徴、性能評価結果について述べる。また、岩沼氏と鍋島氏による「SMT: 個別理論を取り扱う SAT 技術」では、各種の応用・個別理論に最適化された背景理論付き SAT (Satisfiability Modulo Theories; SMT) について解説する。これは、等式、算術、配列、リスト、ビット列などの各種の個別理論に、SAT 証明法/決定手続きを拡張して適用する技術であり、近

年多くの研究がなされている。

SAT 問題が充足可能である場合、問題の解はモデルとして与えられる。長谷川氏、藤田氏および越村氏による「モデル列挙とモデル計数」では、モデル生成、極小モデル生成、モデル列挙およびモデル計数に関して解説を行う。一般に命題式のモデルの個数を数え上げる問題は #SAT と呼ばれ、確率的推論に関する問題が #SAT 問題に変換できることから注目されている。さらに、SAT ソルバーの研究が近年大きく発展したことを受けて、SAT の枠組みを多方面に拡張する試みも盛んになりつつある。平山氏と横尾氏による「*-SAT: SAT の拡張」では、(重み付き) MaxSAT、限量ブール式における QSAT、分散 SAT など、SAT の重要な拡張およびソルバーについて述べる。

SAT ソルバーの性能が近年飛躍的に向上したことにより、SAT 技術の多分野への応用も急速に拡大している。鍋島氏による「SAT によるプランニングとスケジューリング」では、SAT 技術の適用が有効な AI への応用として、プランニングおよびスケジューリングの SAT 符号化に基づく手法について述べる。また工学的な実問題への応用として、番原氏と田村による「SAT によるシステム検証」では、SAT 変換を利用した新しい検査技術である有界モデル検査について述べ、さらに SAT を用いたテストケース自動生成について実験を交えた解説を行う。

なお、SAT 技術がこれほど注目されているにもかかわらず、人工知能学会誌に限らず日本の学会誌においては、SAT の基礎から応用までを含むまとまった解説がこれまで皆無だったと思われる。このため、本特集で取り上げるトピックスについては、基礎から応用まで含めるように配慮しつつも、理論や応用の詳細に立ち入り過ぎることは避け、多くの読者を対象としてできるだけ平易な解説を心掛けた。さらにいずれの解説も、掲載する内容については最新の文献をもとに、著者間で議論を重ねたうえで外せない最重要なものを精選した。読者には、まず井上・田村論文で概要を把握した後に、各論を読んでいただくことをお勧めする。SAT というシンプルな問題が、無限の広がりをもっていることが改めて理解していただけたと思う。本特集が、この分野の専門家のみならずほかの分野の研究者・技術者・学生など多くの方々の一助となり、ますます重要性を増してきている SAT 技術のさらなる発展につながれば幸いである。