

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330085

研究課題名(和文) 基数制約を用いたSATソルバーの拡張とその応用に関する研究

研究課題名(英文) A Study on Extending SAT Solvers with Cardinality Constraints and its Applications

研究代表者

越村 三幸 (Koshimura, Miyuki)

九州大学・システム情報科学研究科(研究院・助教)

研究者番号：30274492

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究で得られた主要な研究成果は次の通り。

(1)複数の戦略を切り替えながら探索を進める方法をSATソルバーに導入することにより性能向上を図る手法の効果を示した。(2)基数制約のSAT符号化の新手法Modulo TotalizerとWeighted Totalizerを考案しその空間計算量を示すとともにその効果をMaxSAT問題を解くことにより示した。(3)MaxSATを利用して以下の問題を解く手法を確立した。帰納論理プログラミング、提携構造形成問題、AES暗号鍵の復元。(4)MaxSATソルバーQMaxSATにUNSATコアを利用する機構を導入した。

研究成果の概要(英文)：The major results of this study are as follows:

(1) Introduce a method of alternating different strategies into SAT solver in order to enhance its performance. (2) Devise two new SAT encodings Modulo Totalizer and Weighted Totalizer for cardinality constraints and give their space complexity. (3) Present methods for solving the following problems with MaxSAT; (i) inductive logic programming, (ii) coalition structure generation, and (iii) reconstructing AES key schedule images. (4) Introduce a mechanism to utilize unsat core in a MaxSAT solver QMaxSAT.

研究分野：知能情報処理

キーワード：SATソルバー 基数制約 SAT符号化 MaxSAT応用

## 1. 研究開始当初の背景

命題論理の充足可能性問題(satisfiability problem, **SAT 問題**)は, Cook によって NP 完全であることが初めて証明された問題として知られている. 様々な組合せ問題が多項式時間で SAT 問題に還元(**SAT 符号化**)されるので, 計算機科学の多くの分野から参照される問題でもある. SAT 問題を高速に解く **SAT ソルバー**があれば, これらの問題も高速に解けることになるので, 高速 SAT ソルバーの開発は実用的にも, また理論的にも重要である.

ここ 10 数年の SAT ソルバーの性能向上は著しく, システム検証やプランニング問題, スケジューリング問題, 制約充足問題, 制約最適化問題, 定理証明等の様々な分野において **SAT を利用した問題解決手法**に大きな性能向上をもたらしている. SAT ソルバーの性能向上は, ソルバーの性能比較を行う競技会の開催によるところが大きい. 2009 年の競技会の Application 部門で優勝したソルバーが 2011 年の競技会の同部門で 6 位に後退したことから分かるように, 性能は着実に向上している.

このような SAT ソルバーの性能向上の恩恵を直接的に享受するための研究が多くなされている(A. Biere, M. Heule, H. van Maaren, T. Walsh eds. Handbook of Satisfiability, IOS Press, 2009). それらはソルバーに手を入れるか否かで二つに大別される. それらは, **SAT ソルバーの拡張**に関するものと SAT 符号化に関するものに大別される. 前者の研究としては, SAT を **最適化問題**に拡張する **MaxSAT** や問題の記述形式である **ブール式**を拡張する **pseudo-Boolean(PB)**などのソルバーを, 最新の SAT ソルバーの拡張によって行うものがある.

こうしたなか, 研究代表者らは, SAT 技術が**求解が困難な問題を解決**する有力な手段になると考え, これを実証すべく精力的に研究に取り組み, 次のような知見を得た.

- SAT ソルバーの拡張や SAT 符号化といった SAT を利用した問題解決は, 専用のソルバーを作成するよりも容易にコンピュータの性能改善の恩恵を享受できる.
- SAT ソルバーで解かれることを前提にした SAT 符号化が, 実際の問題を解く上では重要である. 特にソルバーの単位伝播(unit propagation)と呼ばれる機構に着目した符号化が重要である.
- 多くの問題に頻繁に現れる**基数制約**(cardinality constraints)をソルバーでどのように処理するかが, 個々の問題を現実的な時間で解く際の肝となる.

以上の知見から本研究を開始するに至った.

## 2. 研究の目的

本研究では, 基数制約の処理ができるように SAT ソルバーを拡張し, 組合せ最適化問題を解くための高性能な推論基盤(ソルバー)を提供することを目的とする. 命題論理の充足可能性問題を解く SAT ソルバーは, ここ 10 数年の間に, いくつもの技法が編み出され, 著しく性能が向上した. この恩恵を直接的に享受するために, 本研究では, 既存の高性能 SAT ソルバーを拡張するアプローチを採用する. 基数制約とは, 「高々,  $m$  個しかない」とか「少なくとも  $n$  個はある」といった計数上の制約のことで, 様々な問題に現れる. 本研究では, 幾つかの応用問題にも取り組み, 基数制約を利用した解法の探求を行い, その成果をソルバーの研究開発に活かしていく.

## 3. 研究の方法

以下の研究テーマを設定して研究を進める.

- (1) SAT ソルバーの研究開発: 既開発の SINN をベースに開発を進める. SAT ソルバーの性能向上に大きく寄与している**学習節**は, 計算が進むにつれて生成されるが, これを全て保持するのは現実的ではない. 有用な学習節のみを保持・獲得・利用する機構の研究を行う.
- (2) MaxSAT ソルバーの研究開発: 既開発の QMaxSAT は, SAT ソルバーに基数制約の処理機構を導入して MaxSAT 問題を解くようにしたソルバーである. 基数制約を SAT 符号化して処理する手法と, 符号化しないで直接処理する手法の比較評価を行う. また, UNSAT コアを元に基数制約を作成する手法の評価も行う. これらの評価を元に性能改善・機能拡張を行い, さらなる高速化を実現する.
- (3) 基数制約の SAT 符号化の研究開発: MaxSAT/PB ソルバーで利用されることを前提とした符号化の方法の研究を進める.
- (4) 応用研究開発: MaxSAT ソルバーを利用した応用問題の解法を探求するために, 次の 2 つの問題に取り組み, ソルバーの評価を行い, ソルバーの研究開発にフィードバックする.

マルチエージェントシステムにおける提携構造生成問題  
化学実験データからの帰納推論によるルール抽出

以上, ソルバーの拡張によって得られる知見と応用研究の知見を相互に反映させることで, 既存 SAT 技術の**限界突破**をうらう.

## 4. 研究成果

上記(1)~(4)の研究テーマにそって, 成果を報告する.

- (1) 重複証明を回避するために作られる学習節の評価尺度と保持量に着目し, SAT ソルバー MiniSat2.2 の改良を行った(評価尺度として広く用いられている) LBD を改良した尺度で低い評価の学習節を積

極的に削除すると性能が向上することを定量的に確かめた。また、SAT ソルバー競技会 (SAT Competition 2013) に出品し、SINNminisat1.0.0 が MiniSAT Hack 部門で 1 位、ZENNO.1.0 が Core Solvers, Sequential Application SAT 部門で 2 位の成績をおさめた。複数の戦略を切り替えながら探索を進めるこれらの手法は**以後のソルバーに強い影響**をもたらした。ほとんどのソルバーが同様の戦略を採用するようになった。

また、「SAT ソルバーの傾向判定による高速化手法の探索」「並列 SAT ソルバー SATzilla2012 の開発」「純リテラルの動的な除去」「探索戦略の動的切り替え」による SAT ソルバー高速化の実装と評価を行い、それぞれ効果のあることを確かめた。

- (2) 重み付き MaxSAT 問題にも対応できるように MaxSAT ソルバー QMaxSAT を拡張した。QMaxSAT の性能に大きく関わる基数制約の SAT 符号化については、4 種類を組み込んで問題により自動的に切り替えるようにした。MaxSAT ソルバー評価会 Max-SAT 2013 に出品し、PMS-industrial 部門で 2 位の成績をおさめた。改良版を翌年の MaxSAT2014 に出品し、PMS-crafted 部門の WPMS-crafted 部門で 5 位、PMS-industrial 部門で 7 位、WPMS-industrial 部門で 8 位の成績をおさめた。

また、QMaxSAT に UNSAT コアを利用した基数制約の生成機構を導入したプロトタイプも試作した。

QMaxSAT は **satisfiability-based の代表的なソルバー**として知られるようになり、多くのソルバーの比較実験で用いられている。

- (3) 従来の SAT 符号化 Totalizer を拡張した Weighted Totalizer と、これと Modulo Totalizer を合わせた Weighted Modulo Totalizer を考案・実装した。Totalizer に比べ空間計算量が優れていることを理論的に示すとともにそれを実験的にも確かめた。
- (4) エージェント関係に着目した符号化とルール関係に着目した符号化の両者について外部性の記述がある場合も含めて空間計算量を明らかにした。MaxSAT ソルバーを用いた帰納論理プログラミングを考案し、幾つかの手法の試作を行った。また、MaxSAT を利用した AES 暗号鍵の復元法を考案し、従来手法に比べて優れていることを実験により確かめた。これは**当初の予定にはなかった実験テーマ**である。

当初の予定では、PB ソルバーの研究開発も行う予定であったが、着手できなかった。本研究で得られた基数制約の SAT 符号化を利用した PB ソルバーの開発は今後の課題である。

また、巨大基数に対応するため Modulo Totalizer の拡張も今後取り組んでいきたいと考えている。

#### 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 8 件)

Xiaojuan Liao, Hui Zhang, Miyuki Koshimura. "Reconstructing AES Key Schedule Images with SAT and MaxSAT," *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 査読有, Vol.E99-D, No.1, pp.141-150,

DOI:10.1587/transinf.2015EDP7223

January 1, 2016

Noriaki Chikara, Miyuki Koshimura, Hiroshi Fujita, Ryuzo Hasegawa.

"Inductive Logic Programming Using a MaxSAT Solver," *25th International Conference on Inductive Logic Programming*, 査読有, 2015 年 8 月 21 日 (京都大学楽友会館) [http://www.ilp2015.jp/papers/ILP2015\\_submission\\_35.pdf](http://www.ilp2015.jp/papers/ILP2015_submission_35.pdf)

Xiaojuan Liao, Miyuki Koshimura, Hiroshi Fujita, Ryuzo Hasegawa.

"Extending MaxSAT to Solve the Coalition Structure Generation Problem with Externalities Based on Agent Relations," *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 査読有, Vol.E97-D, No.7, pp.1812-1821, DOI: 10.1587/transinf.E97.D.1812, July 1, 2014.

Xiaojuan Liao, Miyuki Koshimura, Hiroshi Fujita, Ryuzo Hasegawa. MaxSAT Encoding for MC-Net-Based Coalition Structure Generation Problem with Externalities, *IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems*, 査読有, Vol.E97-D, No.7, pp.1781-1789, DOI: 10.1587/transinf.E97.D.1781, July 1, 2014.

Toru Ogawa, YangYang Liu, Ryuzo Hasegawa, Miyuki Koshimura, Hiroshi Fujita. "Modulo Based CNF Encoding of Cardinality Constraints and Its Application to MaxSAT Solvers," *Proceedings of IEEE 25th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2013)*, 査読有, pp.9-17, November 4, 2013 (Washington, DC, USA) DOI: 10.1109/ICTAI.2013.13

Hiroshi Fujita, Miyuki Koshimura, Ryuzo Hasegawa. "SCSat: A Soft Constraint Guided SAT Solver," *Proceedings of 16th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2013)*,

査読有, pp.415-421, July 11, 2013  
(Helsinki, Finland) DOI:  
10.1007/978-3-642-39071-5\_32  
〔学会発表〕(計 24 件)

Aolong Zha, Miyuki Koshimura, Hiroshi Fujita. “**Introducing Pure Literal Elimination into CDCL Algorithm**,” 人工知能学会 第 99 回人工知能基本問題研究会(SIG-FPAI), SIG-FPAI-B502-8, 2016 年 1 月 27 日(湯の原ホテル)  
藤田 博. **SCSat3 によるラムゼーグラフ探索について**, 2015 年度人工知能学会全国大会(第 29 回), 2H5-0S-03b-1, 2015 年 5 月 31 日(公立はこだて未来大学)

長谷川 隆三. [招待講演] **モデル生成型定理証明系と SAT ソルバー**, 人工知能学会 第 97 回人工知能基本問題研究会(SIG-FPAI), SIG-FPAI-B404-19, pp.109-110, 2015 年 3 月 23 日(別府国際コンベンションセンター)

早田 翔, 長谷川 隆三. **重み付き部分 MaxSAT 問題における基数制約符号化手法の改良**, 人工知能学会 第 97 回人工知能基本問題研究会(SIG-FPAI), SIG-FPAI-B404-14, pp.80-84, 2015 年 3 月 23 日(別府国際コンベンションセンター)

早田 翔, 安本 猛, 越村 三幸, 藤田 博, 長谷川 隆三. **高速 SAT ソルバー ZENN 及びその高速化手法**, 2014 年度人工知能学会全国大会(第 28 回), 1D5-0S-11b-1, 2014 年 5 月 12 日(ひめぎんホール(愛媛県民文化会館))

廖 曉鵬, 越村 三幸. **MaxSAT を利用した AES 暗号鍵の復元**, 火の国情報シンポジウム 2014, 2014 年 3 月 4 日(大分大学工学部)

力 規晃, 越村 三幸, 西田 光生, 阿部 幸浩, 藤田 博, 長谷川 隆三. “**MaxSAT ソルバを用いた高分子の組成と物性との関係に関する考察**”, 2013 年度人工知能学会全国大会(第 27 回), 2E5-0S-09b-6, 2013 年 6 月 5 日.(富山国際会議場)

早田 翔, 長谷川 隆三, 藤田 博, 越村 三幸. “**SAT ソルバーの学習節を考慮した新高速化法**”, 2013 年度人工知能学会全国大会(第 27 回), 2E5-0S-09a-2, 2013 年 6 月 5 日.(富山国際会議場)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<https://sites.google.com/site/qmaxsat/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

越村 三幸 (KOSHIMURA Miyuki)

九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・助教

研究者番号: 30274492

(2)研究分担者

長谷川 隆三 (HASEGAWA Ryuzo)

九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・教授

研究者番号: 20274483

藤田 博 (FUJITA Hiroshi)

九州大学・大学院システム情報科学研究  
院・准教授

研究者番号: 70284552

力 規晃 (Chikara Noriaki)

徳山工業高等学校・情報電子工学科・助手

研究者番号: 50290804