

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月24日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2012

課題番号：21300054

研究課題名（和文） 大規模 SAT 問題解決のための EPR プルーバーに関する研究

研究課題名（英文） A Study on EPR Prover for Solving Large-scale SAT Problems

研究代表者

長谷川 隆三 (HASEGAWA RYUZO)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：20274483

研究成果の概要（和文）：大規模な制約充足問題および最適化問題の解法技術を、SAT 技術とモデル生成法を組み合わせることによって開発し、10 件の雑誌論文公表、36 件の学会発表を行った。また、世界をリードするソフトウェア QMaxSAT と SCMiniSat を開発した。前者は2010年から3年連続で国際競技会で優勝、後者は Ramsey 数 $R(4, 8)$ の下界を56から58に更新した。

研究成果の概要（英文）：We conducted the research on technologies solving large-scale Constraint Satisfaction/Optimization Problems by combining SAT technologies and model generation technologies, and published 9 refereed papers and made 36 presentations. In addition, world's leading softwares QMaxSAT and SCMiniSat were developed. QMaxSAT won at the 2010, 2011, and 2012 Max-SAT evaluations in an industrial category and SCMiniSat increased the lower bound of Ramsey number $R(4,8)$ from 56 to 58.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2010年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：探索・論理・推論アルゴリズム、SAT ソルバー、EPR 論理

1. 研究開始当初の背景

計算機を用いた推論技術（自動推論）は、情報システムの正当性の検証や、セキュリティに関する問題の解決に不可欠となりつつある。自動推論分野において、本研究の研究代表者および分担者らは、これまでに主に一階述語論理の定理証明システムの研究開発に従事し、モデル生成法に基づく独自のシステム MGTP を構築している。その主たる成果として、(1) 資源数に応じた並列制御方

式の開発、(2) ノンホーンマジックセットや極小モデル生成などの探索空間削減方式の開発、(3) NAF や様相論理、制約の MGTP 節への変換方式の開発、(4) 法的推論等への応用、を挙げることができる。とりわけ、準群未解決問題を解くことに成功し、評価を得てきた。

一方、MGTP の対象とする分野の一部とも考えられる命題論理式の充足可能性判定 (SAT 問題) の分野では、近年その専用処理

系である SAT ソルバーの性能向上が著しく、様々な問題が SAT 問題に変換されて解けるようになった。今後、実用上ますます大規模な問題の求解が期待されているが、そのためには次の二つの障害への対策が求められている。(1) SAT 問題記述が巨大すぎて現実的な記憶容量に収まらない。(2) 探索空間が巨大すぎて現実的な時間内に解けない。

これらの問題を解決するために、我々は「モデル生成法は EPR (Effectively Propositional) 論理で記述された問題を効率よく扱える」という他の SAT ソルバーに類を見ない特徴に着目した。すなわち、命題表現では巨大で取り扱いが困難な問題も一階述語論理式なら極めてコンパクトに表せて容易に取り扱えるので、上記(1)が解決される。また、推論の効率性に関しても、MGTP では多分岐探索により探索空間を効率的に削減する技法が適用でき、二分探索が基本の DPLL 型 SAT ソルバーより優位な場合が多いので、(2)の解決が見込める。ただし、高速化を目指した FPGA 上の MGTP の実装や、極小モデル (MM) のみを生成する MM-MGTP, MM 指向の DPLL 型 SAT ソルバー等の研究を通じ、モデル生成型と DPLL 型の双方ともに一長一短があることが分かっており、さらなる研究が必要とされている。

以上のような SAT ソルバーの様々な方式に関する課題とは別に、SAT 問題解決一般に共通する課題として、問題個々の特性に着目した解法の追究がある。これまでの多くの経験から、例えば問題記述に含まれる対称性や、推論中に形成される証明構造の特性を上手く捉え、推論モードや探索パラメータを適切に制御することにより問題に特化した解法を得ることが成功の秘訣であると確信する。実際、MGTP はこのアプローチにより準群の未解決問題を解いた成功例を有する。

2. 研究の目的

情報システムの設計・検証など幅広い分野において、個々の問題を SAT 問題に変換して解決する手法が着目されている。本研究の目的は、SAT 変換に基づくアプローチを真に実用的な技術とするため、**大規模な SAT 問題を高速に解く処理系 (SAT ソルバー)**を開発することである。具体的には、以下の三つ課題に重点をおいて研究開発を行う。

- (1) **EPR プルーバー** : SAT 問題は EPR 論理と呼ばれる一階述語論理の部分論理の記述に変換できる。EPR 論理によれば、既存の SAT ソルバーが扱う純粋な命題論理による SAT 問題記述に比べ、記述サイズが桁違いに小さくなる、という利点がある。**EPR 論理を扱える定理証明システム (EPR プルーバー)**

は幾つか存在するが、なかでも研究代表者らが開発した MGTP が有効と考えられる。本研究は、SAT ソルバーを MGTP のような EPR プルーバーとして実現することにより実用性の向上を目指す。

- (2) **大規模化** : 現状の SAT ソルバーでは変数の個数が 10 万程度、節の個数が 100 万程度の問題を扱えるが、まだ実用的に十分とは言えない。そこで、より大規模な問題を扱うために、①問題を小さく分割 (問題分割方式)、あるいは、②探索空間を分割 (空間分割方式) し、分散化された SAT ソルバーで協調的に求解する手法を開発する。

- (3) **問題特化型解法** : 実用規模の SAT 問題を解決するためには、個々の問題ごとの特徴を上手く捉え、適切な解法を得ることが大切である。特に問題に含まれる対称性等の静的構造や、推論展開に沿って得られる証明構造等の動的な特性を有効に活用するべきである。本研究は、SAT ソルバーにおいて問題記述の構造や証明構造の分析、観察、可視化、およびそれらに基づく推論モードや各種パラメータの制御などの機能充実を図ることにより、**問題特性に適合した解決手法**を得ることを目指す。このアプローチを、Ramsey 問題などの未解決問題に適用して有効性を実証する。

3. 研究の方法

研究テーマとして「A. EPR プルーバーの優位性」、「B. 問題/空間分割による大規模化の効果」、「C. 問題特化型アプローチの有効性」を設定した。またそれぞれのテーマについて、具体的なサブテーマ (A. 1~A. 6, B. 1~B. 3, C. 1~C. 4) を設けて研究を進めた。

各研究者は研究協力者 (主に学生) と共に分担する研究およびソフトウェア開発を進めるとともに、研究者・研究協力者の全 10 名程度が参加する全体会合を年 4 回程度開催し、研究内容の意見交換および研究計画・方法に関する議論を行った。

国内の SAT コミュニティの研究会 (年 3 回程度開催) に積極的に参加し、研究成果に対する客観的な評価を得るようにつとめた。

また、国際的に有名な SAT ソルバー MiniSAT の作者らの日本での講演会を共同企画するなど該当分野の研究レベル向上のための活動を行った。

4. 研究成果

(1) 10 編の雑誌論文 (査読有の国際会議論文を含む)、36 件の学会発表 (非公開研究会を含む)、1 件の特許出願を行った。

(2) Max-SAT ソルバー QMaxSAT の研究開発：部分 MaxSAT をインクリメンタルに SAT 問題に符号化し求解する QMaxSAT を開発した。QMaxSAT は、2010, 2011, 2012 年の Max-SAT Evaluation の部分 Max-SAT 産業部門で優勝した。また 2012 年は同工芸部門でも優勝した。

(3) ソフト制約が扱える SAT ソルバー SMiniSat の開発：ソフト制約によって探索を誘導し、通常の SAT ソルバーには難解とされる問題の求解を目指す SMiniSat を開発した。SMiniSAT は、Ramsey 数 $R(4, 8)$ の下界をそれまで知られていた 56 から 58 に更新した。

(4) 未解決ジョブショップスケジューリング問題 (JSSP) の解決：SAT 変換により、これまで解が不明だった ABZ9 と YN1 について求解に成功した。また、他の未解決 JSSP の 4 問についてもそれまでの下界を大幅に引き上げた。

(5) 極小モデル生成器 MiniMG の開発：モデル生成法の効率に大きな影響を与える違反節選択ヒューリスティックに着目し、充足可能、充足不能、いずれの問題にも効果的な手法を開発した。

(6) MiniSAT の高速化：リスタート戦略、学習節の評価指標、探索手法のヒューリスティックに着目して数々の手法を試み、既存手法より効率的な手法を開発した。

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 10 件)

- 1) H. Fujita, A New Lower Bound for the Ramsey Number $R(4, 8)$, 査読無, CoRR abs/1212.1328, 2012.
- 2) X. Liao, M. Koshimura, H. Fujita, R. Hasegawa, Solving the Coalition Structure Generation Problem with MaxSAT, Proc. of 24th Int'l Conf. on Tools with Artificial Intelligence, 査読有, pp.910-915, 2012.
- 3) M. Koshimura, T. Zhang, H. Fujita, R. Hasegawa, QMaxSAT: A Partial Max-SAT Solver, J. on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation, 査読有 Vol.8, pp.95-100, 2012.
- 4) X. An, M. Koshimura, H. Fujita, R. Hasegawa, QMaxSAT version 0.3 & 0.4, Proc. of FTP 2011, 査読有, pp.7-15, 2011.
- 5) X.-F. Zhang, B. Tong, M. Koshimura, H. Fujita, R. Hasegawa, A Multi-Layer Hybrid Particle Swarm Optimization Model for Flow Shop Scheduling, Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems, 査読有, Vol.12, No.4 (Machine Learning Applications PartII), pp.1-6, 2010.

6) 矢野 明浩, 中村 徹, 長谷川 隆三, 藤田 博, 越村 三幸, 極小モデル生成器 MiniMG の試作, 査読有, 九州大学大学院システム情報科学紀要, 第 15 巻, 第 2 号, pp. 91-98, 2010.

7) M. Koshimura, H. Nabeshima, H. Fujita, R. Hasegawa, Solving Open Job-Shop Scheduling Problems by SAT Encoding, 査読有, IEICE TRANSACTIONS on Information and Systems (Letter), Vol.E93-D, No.8, pp.2316-2318, 2010.

8) 長谷川 隆三, 藤田 博, 越村 三幸, モデル列挙とモデル計数, 査読有, 人工知能学会誌, Vol. 25, No. 1, pp.96-104, 2010.

9) M. Koshimura, H. Nabeshima, H. Fujita, R. Hasegawa, Minimal Model Generation with respect to an Atom Set, 査読有, Proc. of FTP 2009, pp.49-59, 2009.

[学会発表] (計 36 件)

1) 佐々木 佑介, 長谷川 隆三, モデル生成型 SAT ソルバーの学習節による分岐効果について, 人工知能基本問題研究会 (第 87 回), SIG-FPAI-B202-12, 2012 年 11 月 17 日 (慶応義塾大学 日吉キャンパス)

2) 越村 三幸, 廖 晓鵬, 藤田 博, 長谷川 隆三, MaxSAT の一拡張について, 第 11 回情報科学技術フォーラム (FIT 2012), F-028, 2012 年 9 月 5 日 (法政大学 小金井キャンパス)

3) 力 規晃, 越村 三幸, 橋本 司, 西田 光生, 阿部 幸浩, 藤田 博, 長谷川 隆三, 帰納論理プログラミングを用いた高分子の組成と物性との関係に関する考察, 第 11 回情報科学技術フォーラム (FIT 2012), A-012, 2012 年 9 月 4 日 (法政大学 小金井キャンパス)

4) 越村 三幸, 安 宣燁, 藤田 博, 長谷川 隆三, QMaxSAT: 部分 MaxSAT ソルバーの簡便な一実装, 日本ソフトウェア科学会第 28 回大会, 6E-2, 2011 年 9 月 29 日 (沖縄産業支援センター)

5) 明石 裕子, 越村 三幸, 藤田 博, 長谷川 隆三, UNIX の FORK 機能に基づく SAT ソルバーの並列化, 日本ソフトウェア科学会第 28 回大会, 2B-2, 2011 年 9 月 27 日 (沖縄産業支援センター)

6) 越村 三幸, 安 宣燁, 藤田 博, 長谷川 隆三, QMaxSAT: Q-dai MaxSAT ソルバー, 2011 年度 人工知能学会全国大会 (第 25 回), 3J1-0S7-3, 2011 年 6 月 3 日 (アイーナ いわて県民情報交流センター)

7) 越村 三幸, 張 形, 藤田 博, 長谷川 隆三, Partial Max-SAT ソルバー QMaxSAT の評価, 人工知能基本問題研究会 (第 81 回), SIG-FPAI-B004, 2011 年 1 月 31 日 (山梨大学 甲府キャンパス)

8) 力 規晃, 越村 三幸, 藤田 博, 長谷川 隆三, BOINC による SAT ソルバーの並列実行,

第9回情報科学技術フォーラム (FIT2010),
F-019, 2010年9月8日 (九州大学 伊都キ
ャンパス)

9) 矢野 明浩, 越村 三幸, 藤田 博, 長谷川
隆三. モデル生成による SAT ソルバの並列
化, 情報処理学会創立 50 周年記念 (第 72 回)
全国大会, 1W-9, 2010年3月9日 (東京
大学本郷キャンパス)

10) 越村 三幸, 鍋島 英知, 藤田 博, 長谷
川 隆三. SAT 変換による未解決ジョブショ
ップスケジューリング問題への挑戦, スケ
ジューリング・シンポジウム 2009, 2009
年9月17日 (岡山大学)

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 1 件)

名称: 実験システム, 実験支援方法, および
実験支援プログラム

発明者: 長谷川 隆三, 藤田 博, 越村 三幸,
力 規晃, 阿部幸浩, 西田光生

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2013-031416

出願年月日: 2013年2月20日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計 0 件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

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

<http://opal.inf.kyushu-u.ac.jp/~fujita/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 隆三 (HASEGAWA RYUZO)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号: 20274483

(2) 研究分担者

藤田 博 (FUJITA HIROSHI)

九州大学・システム情報科学研究所・准教授

研究者番号: 70284552

越村 三幸 (KOSHIMURA MIYUKI)

九州大学・システム情報科学研究所・助教
研究者番号: 30274492

力 規晃 (CHIKARA NORIAKI)

徳山工業高等専門学校・情報電子工学科・助手

研究者番号: 50290804