

令和元年6月1日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02803

研究課題名(和文) SATを基盤とした新しい制約プログラミングシステムの研究開発

研究課題名(英文) Research and Development of a New Constraint Programming System based on SAT

研究代表者

田村 直之 (Tamura, Naoyuki)

神戸大学・情報基盤センター・教授

研究者番号：60207248

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,180,000円

研究成果の概要(和文)：高性能な推論を必要とする種々の分野において、SAT技術を活用したSAT型システムが成功を収めている。本研究では、SAT技術を基盤とした制約プログラミングシステム(以下、SAT型CPシステム)を対象とし、従来のSAT技術の適用範囲を超えた範囲に拡張することを目的として(A) 時相論理に対する拡張、(B) 多目的最適化問題に対する拡張、(C) 並列型ソルバー、(D) 応用システムに関する研究開発を行った。その結果、国際制約ソルバー競技会での優勝、既存手法では解けなかった問題の解決などの良い成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度な推論を必要とする人工知能システムなどの実現を目的として、その基本技術となるSAT型CPシステムの研究開発を行った。開発したシステムの1つであるsCOPIは、2018年の国際制約ソルバー競技会の2部門で優勝している。また、ペトリネットのデッドロック検出、研究室配属問題、時間割問題、テストケース生成、配線問題などへの応用研究を行い、これまでよりも優れた結果を得た。

研究成果の概要(英文)：SAT-based systems utilizing SAT solving technologies have been succeeding in various fields requiring highly efficient inference. In order to extend the SAT technology beyond its current application area, we conducted the research and development of SAT-based constraint programming systems in the following topics: (A) Extension to temporal logic, (B) Extension to multi-objective optimization problems, (C) Parallel solvers, and (D) Research and Development of application systems. As a result, we obtained several good accomplishments, such as winning at the international constraint solver competition, and solving problems which have not been solved with previous methods.

研究分野：情報科学・ソフトウェア

キーワード：制約プログラミング 充足可能性判定問題 命題論理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 高性能な推論を必要とする種々の分野において、SAT 技術を活用した SAT 型システムが成功を収めている。SAT 技術を基盤とした制約プログラミングシステム (以下、SAT 型 CP システム) は、与えられた問題を命題論理式である SAT 問題に符号化(翻訳)するコンパイラの一つであり、SAT 型システム開発におけるキー技術となっている。一方、世界では、SAT 技術の適用範囲を NP を超えた問題へ拡張する研究が始まりつつある。

(2) 2016 年に開催された人工知能に関する国際会議 AAAI 2016 では Beyond NP に関するワークショップが開催された。そこでは、SAT 技術発展の目標として「モデル計数」、「知識コンパイラ」、「高階ソルバー」、「最適化や極小問題(subset minimal problem)等への対応」の 4 点が挙げられ、NP を超えた問題に対する SAT 技術の実用化が課題とされている。

2. 研究の目的

(1) Beyond NP の課題中「知識コンパイラ」、「最適化や極小問題等への対応」に着目し、本課題の研究期間内に下記の研究開発を進め、新しい SAT 型 CP システムの実装、実用的な応用問題に対する評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 以下の 4 つの研究テーマを設定し、研究開発を進めた。

◎ 「(A) 時相論理に対する拡張」: SAT 型 CP システムの対象を時相論理に拡張する。時間経過と共に状態が変化する系の記述、およびその解析を可能にする。SAT 問題への翻訳方法の検討、インクリメンタル SAT 解法の導入による処理の効率化などが研究課題となる。

◎ 「(B) 多目的最適化問題に対する拡張」: SAT 型 CP システムを多目的最適化問題に対応できるように拡張する。SAT 問題を繰り返し解くことでパレート最適解の列挙を実現する方法の検討、インクリメンタル SAT 解法の導入による処理の効率化などが研究課題となる。

◎ 「(C) 並列型ソルバー」: Beyond NP の問題に対し、複数の SAT ソルバーによる並列探索を導入する。問題分割や複数探索戦略の導入について検討し、実行時間の短縮を図ることが研究課題となる。

◎ 「(D) 応用システム」: 実用的な応用問題を取り上げ、応用システムを開発・評価する。時相論理に対する拡張についてはシステム検証とペトリネットを、多目的最適化問題に対する拡張については時間割問題と組合せデザインを取り上げる。また、並列型ソルバーを用いた場合の性能向上についても評価する。その他、システム生物学、パッキング問題、スケジューリング問題、グラフ探索、配線問題、クラウド上のソフトウェア最適配置問題も応用研究の対象とする。

4. 研究成果

(1) 設定した 4 つの研究テーマに関し、以下の研究成果を得た。

◎ 「(A) 時相論理に対する拡張」: SAT 型 CP システムの対象を時相論理および様相論理に拡張する研究を進め、ペトリネットのデッドロック検出 (雑誌論文①, 学会発表②)、様相命題論理 S4 の充足可能性判定 (学会発表③)を実現した。特に、ペトリネットのデッドロック検出では、既存の SAT 型手法ではトークン数が 1 以下のペトリネットしか取り扱えなかったが、これを一般のペトリネットに拡張した点に特徴がある。国際的な競技会である Model Checking

Contest 2017 デッドロック検出部門でのベンチマーク問題で、既存ソルバーと比較したところ、他のソルバーがデッドロック検出に失敗した問題での検出に成功し、提案手法の有効性が確認できた。なお、雑誌論文①は情報処理学会の 2018 年度特選論文に選出されている。様相命題論理 S4 の充足可能性判定では、様相命題論理式の充足可能性問題を CNF 式の充足可能性問題に還元する手法を考案し、既存手法より優れた性能が得られる場合があることを報告した。

① 「(B) 多目的最適化問題に対する拡張」：多目的最適化問題に関して雑誌論文②③④、学会発表⑤を成果発表し、全解列挙に関して雑誌論文⑥を成果発表した。特に雑誌論文⑥では、多目的最適化問題のパレート最適解が、目的関数の値を順序符号化した場合の極小モデルと一対一対応することを示し、いくつかの問題で既存手法より優れた性能を持つことを示した。

② 「(C) 並列型ソルバー」：並列型ソルバーに関して雑誌論文⑦と学会発表⑧⑨を成果発表した。特に雑誌論文⑦で述べた SAT 型 CP システムの sCOP は、国際制約ソルバー競技会 XCSP 2018 に参加し、逐次 CSP ソルバー部門と並列 CSP ソルバー部門の 2 部門で第 1 位となった。この結果は、本研究で進めた SAT 型 CP システムの手法が、他の既存 CP システムと比較して優れた性能を持つことを示している。学会発表⑧⑨で発表した並列型 SAT ソルバーは、決定的な動作が可能な点に大きな特徴がある。

③ 「(D) 応用システム」：応用システムに関しては研究室配属問題 (雑誌論文⑩)、時間割問題 (雑誌論文⑪⑫、学会発表⑬)、テストケース生成 (雑誌論文⑭)、配線問題 (学会発表⑮) などについて成果発表を行った。また、それらの応用システムを開発するためのベースとなる SAT 型 CP システムに関して、雑誌論文⑯⑰⑱⑲を公表した。

(2) 雑誌論文 28 件、学会発表 35 件により研究成果を発表した。うち特選論文 1 件 (雑誌論文①)、解説論文賞 1 件 (雑誌論文⑫)、大会優秀賞 1 件 (学会発表⑮)、発表賞 1 件 (学会発表⑯)、招待講演 4 件 (学会発表⑳㉑㉒㉓) が含まれる。また、特筆すべき成果としては、開発した SAT 型 CP ソルバー sCOP が、2018 年の国際制約ソルバー競技会において、逐次 CSP ソルバーおよび並列 CSP ソルバーの 2 部門で優勝した点が挙げられる

(<http://www.cril.univ-artois.fr/XCSP18/files/resultsXCSP3-18.pdf>)。

(3) 研究開発したソフトウェアを公開した: sCOP, Sugar, Copris, Scarab, GlueMiniSat。それぞれのソフトウェアの URL は「5. 主な発表論文等」の〔その他〕中に記述している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 28 件)

① 寸田 智也, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之, 井上 克巳, SAT 技術を用いたペトリネットのデッドロック検出手法の提案 (特選論文), 情報処理学会論文誌, 査読有, 59(9), 2018, pp.1749-1760

② 南 雄之, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之, ブール基数制約を経由した擬似ブール制約の SAT 符号化手法, コンピュータソフトウェア, 査読有, 35(3), 2018, pp.65-78,

[10.11309/jssst.35.3_65](https://doi.org/10.11309/jssst.35.3_65)

③ Takehide Soh, Daniel Le Berre, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, sCOP: SAT-based Constraint Programming System, Proceedings of XCSP3 Competition 2018, 査読無, -, 2018, pp.93-94

- ④ 藤井 樹, 伊藤 靖展, 鍋島 英知, 学生の選好に同順位を含む研究室配属問題, 人工知能学会論文誌, 査読有, 34(3), 2019, pp.A-I91_1-16, [10.1527/tjsai.A-I91](https://doi.org/10.1527/tjsai.A-I91)
- ⑤ Maxime Clement, Tenda Okimoto, [Katsumi Inoue](#), Multi-Objective Distributed Pseudo-Tree Optimization, Proceedings of the 17th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2018), 査読有, -, 2018, pp.1903-1905
- ⑥ [Mutsunori Banbara](#), [Katsumi Inoue](#), Benjamin Kaufmann, Tenda Okimoto, Torsten Schaub, [Takehide Soh](#), [Naoyuki Tamura](#), Philipp Wanko, teaspoon: Solving the Curriculum-based Course Timetabling Problems with Answer Set Programming, Annals of Operations Research, 査読有, 275(1), 2019, pp.3-37, [10.1007/s10479-018-2757-7](https://doi.org/10.1007/s10479-018-2757-7)
- ⑦ [Takehide Soh](#), [Mutsunori Banbara](#), [Naoyuki Tamura](#), Proposal and Evaluation of Hybrid Encoding of CSP to SAT Integrating Order and Log Encodings, International Journal on Artificial Intelligence Tools, 査読有, 26(1), 2017, -, [10.1142/S0218213017600053](https://doi.org/10.1142/S0218213017600053)
- ⑧ [Takehide Soh](#), [Mutsunori Banbara](#), [Naoyuki Tamura](#), Daniel Le Berre, Solving Multiobjective Discrete Optimization Problems with Propositional Minimal Model Generation, Proceedings of the 23rd International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2017), 査読有, 10416, 2017, pp.596-614, [10.1007/978-3-319-66158-2_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2_38)
- ⑨ [Hidetomo Nabeshima](#), [Katsumi Inoue](#), Coverage-Based Clause Reduction Heuristics for CDCL Solvers, Proceedings of the 20th International Conference Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2017), 査読有, -, 2017, pp.136-144, [10.1007/978-3-319-66263-3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66263-3)
- ⑩ [Mutsunori Banbara](#), [Katsumi Inoue](#), Hiromasa Kaneyuki, Tenda Okimoto, Torsten Schaub, [Takehide Soh](#), [Naoyuki Tamura](#), catnap: Generating Test Suites of Constrained Combinatorial Testing with Answer Set Programming, Proceedings of the 14th International Conference on Logic Programming and Nonmonotonic Reasoning (LPNMR 2017), 査読有, 10377, 2017, pp.265-278, [10.1007/978-3-319-61660-5_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-61660-5_24)
- ⑪ 迫 龍哉, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之, 鍋島 英知, 井上 克巳, インクリメンタル SAT 解法ライブラリとその応用, コンピュータソフトウェア, 査読有, 33(4), 2016, pp.16-29, [10.11309/jssst.33.4_16](https://doi.org/10.11309/jssst.33.4_16)
- ⑫ Takahisa Toda, [Takehide Soh](#), Implementing Efficient All Solutions SAT Solvers, Journal of Experimental Algorithmics, 査読有, 21(1), 2016, pp.1-44, [10.1145/2975585](https://doi.org/10.1145/2975585)
- ⑬ Maxime Clement, Tenda Okimoto, [Katsumi Inoue](#), [Mutsunori Banbara](#), Σ_x -Optimal Solutions in Highly Symmetric Multi-Objective Timetabling Problems., Proceedings of the 11th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2016), 査読有, -, 2016, pp.63-79
- ⑭ [Hidetomo Nabeshima](#), Koji Iwanuma, [Katsumi Inoue](#), GlueMiniSat 2.2.10-81, Proceedings of SAT Competition 2016: Solver and Benchmark Descriptions (Bordeaux, France, July 5-8, 2016), Department of Computer Science Series of Publications, 査読有, B-2016-1, 2016, pp.43
- ⑮ 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之, SAT 型制約プログラミングシステムと周辺技術 (解説論文賞), コンピュータソフトウェア, 査読有, 34(1), 2017, pp.67-80, [10.11309/jssst.34.1_67](https://doi.org/10.11309/jssst.34.1_67)

〔学会発表〕(計 35 件)

- ① 神原 和裕, 鍋島 英知, ポートフォリオ型並列 SAT ソルバーにおける適応型探索戦略, 人工知能学会 第 109 回人工知能基本問題研究会, 2019
- ② 飯野 有軌, 田村 直之, 番原 睦則, 宋 剛秀, SAT ソルバーを用いた様相命題論理 S4 の充足可能性判定, 日本ソフトウェア科学会 第 35 回大会, 2018
- ③ 番原 睦則, SAT から解集合プログラミングへ (招待講演), 第 31 回人工知能学会全国大会 オーガナイズドセッション「OS-2 SAT 技術の理論, 実装, 応用」, 2017
- ④ Maxime Clement, Tenda Okimoto, Katsumi Inoue, Comparing Multi-Objective Selection Methods using a Simulation of Dynamic Sensor Network, 第 31 回人工知能学会全国大会, 2017
- ⑤ 番原 睦則, 解集合プログラミングによるカリキュラムベース・コース時間割編成 (招待講演), 第 29 回 RAMP シンポジウム, 2017
- ⑥ 後藤 優也, 鍋島 英知, 決定的ポートフォリオ型並列 SAT ソルバーの待ち時間削減による高速化手法, 人工知能学会 第 106 回人工知能基本問題研究会, 2018
- ⑦ 迫 龍哉, 川原 征大, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之, 鍋島 英知, SAT 型制約ソルバーによるナンバーリンクの解法とその評価 (全国大会優秀賞受賞), 2016 年度 人工知能学会全国大会, 2016
- ⑧ 鍋島 英知, SAT ソルバーの最近の技術動向 (招待講演), 第 30 回人工知能学会全国大会, 2016
- ⑨ 宋 剛秀, 田村 直之, SAT ソルバーの最新動向と利用技術 (PPL2017 発表賞 (一般の部) 受賞), 第 19 回プログラミングおよびプログラミング言語ワークショップ (PPL 2017), 2017
- ⑩ 番原 睦則, SAT ソルバーの進歩 (招待講演), 2017 年電子情報通信学会総合大会, 依頼シンポジウムセッション「AI-1: 組合せ最適化問題の発見的手法とその VLSI CAD への応用」, 2017
- ⑪ 寸田 智也, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之, SAT 技術を用いた正規ペトリネットのデッドロック検出手法の提案, 日本ソフトウェア科学会第 33 回大会, 2016

〔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

- ① CSPSAT3 プロジェクト: <http://www.edu.kobe-u.ac.jp/istc-tamlab/cpsat/>
- ② sCOP: <https://tsoh.org/sCOP/>
- ③ Sugar: <http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/sugar/>
- ④ Copris: <http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/copris/>
- ⑤ Scarab: <https://tsoh.org/scarab/>
- ⑥ GlueMiniSat: <https://sites.google.com/a/nabelab.org/glueminisat/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名： 宋 剛秀

ローマ字氏名： (SOH, Takehide)

所属研究機関名： 神戸大学

部局名： 情報基盤センター

職名： 助教

研究者番号(8桁)： 00625121

研究分担者氏名： 番原 睦則

ローマ字氏名： (BANBARA, Mutsunori)

所属研究機関名： 名古屋大学

部局名： 情報学研究科

職名： 教授

研究者番号(8桁)： 80290774

研究分担者氏名： 井上 克巳

ローマ字氏名： (INOUE, Katsumi)

所属研究機関名： 国立情報学研究所

部局名： 情報学プリンシプル研究系

職名： 教授

研究者番号(8桁)： 10252321

研究分担者氏名： 鍋島 英知

ローマ字氏名： (NABESHIMA, Hidetomo)

所属研究機関名： 山梨大学

部局名： 医学工学総合研究部

職名： 准教授

研究者番号(8桁)： 10334848

(2)海外共同研究者

海外共同研究者名： Daniel Le Berre

国名： フランス

所属研究機関名： アルトワ大学 職名： 教授

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。