

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00099

研究課題名(和文) SAT符号化を用いた制約解集合プログラミングに関する研究開発

研究課題名(英文) Research and Development on Constraint Answer Set Programming Using SAT Encoding

研究代表者

番原 睦則 (BANBARA, Mutsunori)

神戸大学・情報基盤センター・准教授

研究者番号：80290774

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、解集合プログラミング(ASP; Answer Set Programming)と制約プログラミング(CP; Constraint Programming)を融合した制約解集合プログラミング(以下、制約ASP)に関する研究開発を行った。制約ASPは、制約充足問題(CPの言語)を取り扱えるように言語拡張されており、整数の有限領域上の算術制約などを直接表現できる。事前処理型と遅延処理型の2種類の制約ASPソルバーの設計・実装・評価を行い、その有効性を示した。

研究成果の概要(英文)：We focused research and development on Constraint Answer Set Programming (CASP), an integration of Answer Set Programming (ASP) and Constraint Programming (CP). CASP allows for direct representation of Constraint Satisfaction Problems (CSPs) over finite domains of Integers. We have developed two CASP solvers. One is based on a translation-based approach where a CSP is fully translated into ASP and then solved by an ASP solver. Another is based on a lazy approach where an ASP solver is augmented with dedicated propagators for CSPs. We established the competitiveness of our approach by empirically contrasting our solvers and other different CASP/CP solvers.

研究分野：情報学・計算基盤・ソフトウェア

キーワード：解集合プログラミング 制約プログラミング SAT技術

## 1. 研究開始当初の背景

命題論理の充足可能性判定 (SAT) 問題は、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 は計算機科学および人工知能における最も基本的な問題として、プログラム検証、プランニング、スケジューリング、定理証明など、さまざまな分野に応用されている。近年、大規模な 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、数多くの SAT 型システムが開発され成功を収めている。

SAT および関連分野における研究の進捗は著しく、SAT 技術の適用範囲のさらなる拡大を目指し、次世代 SAT 技術の研究開発が国内外で活発化している。以下、SAT、解集合プログラミング (ASP; Answer Set Programming)、制約プログラミング (CP; Constraint Programming) の研究動向をまとめる。

- SAT 型システムとは、与えられた問題を SAT に翻訳 (SAT 符号化) し、SAT ソルバーを用いて求解するシステムである。しかし、各応用分野において個別に SAT 符号化の研究が行われており、SAT 型システムに対する統一的なアプローチは確立されていない。
- ASP は一階論理に基づく表現力の高いモデリング言語と安定モデル意味論に基づいた解集合を求める ASP ソルバーからなる。記号を (整数等で置換することなく) 直接扱うことができ、記号上の制約を簡潔に記述できる。しかし、一般の算術上の制約に対する拡張は確立されていない。
- CP は、整数等の各種ドメインに対して、算術上の制約式を満たす解を効率よく探索することができる。しかし、ASP と比較して表現力が劣るため、SAT 型システムで成功した様々な応用分野の問題を統一的に記述するには限界がある。

このように ASP と CP は相補的な関係にある。また、どちらも国際競技会で優勝経験のある SAT 技術を応用した高速なソルバーが開発されているという共通点を持ち、SAT 技術との親和性も高い。本研究が対象とする制約 ASP は、ASP と CP を融合したものであり、SAT 型システムを統一的に実現するための一手法と位置づけることができる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、解集合プログラミング (ASP) と制約プログラミング (CP) を融合した制約解集合プログラミング (以下、制約 ASP) の実現を目的とし、SAT 符号化技術に応用した新しい制約 ASP ソルバーについて

研究開発を進める。特長的な応用研究を通じて、手法およびソルバーを評価し、制約 ASP の利点・有効性・実用性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

具体的な研究テーマは以下の 4 つである。

- A) 制約 ASP のための言語拡張  
ASP 言語を整数の有限領域上の制約充足問題・制約最適化問題を取り扱えるように拡張した言語を設計する。ASP 言語では、組合せ問題を解くために便利なアグリゲートと呼ばれる表記法が用意されている。このアグリゲートを算術式および CP のグローバル制約を記述できるように拡張する。
- B) 制約 ASP ソルバーの開発  
事前処理型と遅延処理型の 2 種類のソルバーについて研究開発を行う。前者は制約 ASP を ASP に翻訳し、ASP ソルバーを使って求解するソルバーである。翻訳方法については、研究代表者らが独自に開発した順序符号化を応用する。後者は制約充足・制約最適化に特化した既存ソルバーと最新の ASP ソルバーを効果的に組合せるものであり、二つのソルバーを密に連携させるための理論伝播の実装が研究課題となる。
- C) 制約 ASP ソルバーの拡張  
列挙問題や制約最適化問題を効率よく解くために、インクリメンタル解法および充足不能コアを用いた最適化探索について研究開発を行う。また、極小モデル生成を用いた多目的最適化問題の解法についても検討する。
- D) 制約 ASP の特長的なアプリケーションの開発および問題記述例の蓄積  
ソフトウェア工学分野のテストケース生成問題やスケジューリング分野の時間割問題を中心に問題記述の蓄積を進める。その他にもシステム生物学、組合せデザインの諸問題について研究調査を行う。特に、時間割問題は特長的なアプリケーションとして重点的に研究調査を行う。

## 4. 研究成果

初年度 (2015 年度) は、(A) 言語拡張と (B) ソルバー開発を中心に研究開発を進めた。海外共同研究者・Torsten Schaub 教授 (ポツダム大学・ドイツ) と協力して、既存の ASP 言語に対して、整数の有限領域上の制約充足問題 (CP の言語) を記述できるように拡張を行った。制約充足問題を ASP に符号化し、既存の ASP ソルバーで求解する事前処理型の制約 ASP ソルバー aspartame を開発した [業績 (J10)]。この aspartame ソルバーは、高速 SAT 型 CP ソルバー sugar とほぼ同等の性能を示した。さらに、制約充足問題を SAT/ASP に符号化する新しい方法として、順序符号化と対数

符号化を融合したハイブリッド符号化を提案した[業績(J2)(J9)]。この符号化は、順序符号化と比較してより大規模な問題に適用可能である点が特長である。

2016年度は、前年度に引き続き(A)と(B)の研究開発を進め、また(C)ソルバー拡張と(D)応用研究にも着手した。列挙問題、制約最適化問題を効率よく解くための技術として、SATの全解を列挙するALLSATおよびのインクリメンタル解法の研究開発を行った[業績(J5)(J6)]。ハイブリッド符号化とその関連研究に対して、研究分担者・宋剛秀が第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)の発表賞(一般の部)を受賞した。また、時間割問題に関する応用研究を行った[業績(J7)(J8)]。さらに、回路の配線問題と親和性の高い多層ナンバーリンクを解くASP符号化を開発し、アルゴリズムデザインコンテスト(DAシンポジウム2016に併設)において第2位となり優秀賞を受賞した[業績(P6)]。

最終年度(2017年度)は、(A)~(D)のすべての研究テーマについて研究開発を完了し、以下に述べる成果を得た。海外共同研究者・Torsten Schaub教授と共同で遅延処理型の制約ASPソルバーclingconを開発した[業績(J1)]。さらに、制約ASPを多目的最適化問題に拡張する試みとして、極小モデル生成に基づく多目的最適化問題の解法について研究を行った[業績(J3)]。応用研究としては、ソフトウェアのテストケース生成問題に関する応用研究を行い、未解決問題の最適値決定など既存研究より優れた結果を得た[業績(J4)]。また、昨年度に続き、アルゴリズムデザインコンテスト(DAシンポジウム2017に併設)において特別賞を受賞した[業績(P2)]。さらに、解集合プログラミングに関する招待講演を2件行った[業績(P1)(P3)]。

#### 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13件)

(J1) Mutsunori Banbara, Benjamin Kaufmann, Max Ostrowski, and Torsten Schaub. Clingcon: The Next Generation. Theory and Practice of Logic Programming, 17(4):408-461, Cambridge Journals, 2017. DOI: 10.1017/S1471068417000138. 査読有

(J2) Takehide Soh, Mutsunori Banbara and Naoyuki Tamura. Proposal and Evaluation of Hybrid Encoding of CSP to SAT Integrating Order and Log Encodings. International Journal on Artificial Intelligence Tools, Vol.26, No.1, 1760005 (29 pages), World Scientific Publishing Company, 2017. DOI: 10.1142/S0218213017600053. 査読有

(J3) Takehide Soh, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, and 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), LNCS, Vol.10416, pp.596-614, Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-66158-2\_38. 査読有

(J4) Mutsunori Banbara, Katsumi Inoue, Hiromasa Kaneyuki, Tenda Okimoto, Torsten Schaub, Takehide Soh, and 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), LNAI, Vol.10377, pp.265-278, Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-61660-5\_24. 査読有

(J5) 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, 33(4):16-29, 2016. DOI: 10.11309/jssst.33.4\_16. 査読有

(J6) Takahisa Toda and Takehide Soh. Implementing Efficient All Solutions SAT Solvers. Journal of Experimental Algorithmics, 21(1):1-44, 2016. DOI: 10.1145/2975585. 査読有

(J7) Mutsunori Banbara, Katsumi Inoue, Benjamin Kaufmann, Torsten Schaub, Takehide Soh, Naoyuki Tamura, and Philipp Wanko. teaspoon: Solving the Curriculum-Based Course Timetabling Problems with Answer Set Programming. Proceedings of the 11th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT 2016), pp.13-32, 2016. ISBN: 978-0-9929984-1-7. 査読有

(J8) Maxime Clement, Tenda Okimoto, Katsumi Inoue, and Mutsunori Banbara.  $\sum_x$ -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), pp.63-79, 2016. ISBN: 978-0-9929984-1-7. 査読有

(J9) Takehide Soh, Mutsunori Banbara, and Naoyuki Tamura. A Hybrid Encoding of CSP

to SAT Integrating Order and Log Encodings. Proceedings of the 27th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2015), pp.421-428, IEEE Computer Society, 2015. DOI: 10.1109/ICTAI.2015.70. 査読有

(J10) Mutsunori Banbara, Martin Gebser, Katsumi Inoue, Max Ostrowski, Andrea Peano, Torsten Schaub, Takehide Soh, Naoyuki Tamura, and Matthias Weise. aspartame: Solving Constraint Satisfaction Problems with Answer Set Programming. Proceedings of the 13th International Conference on Logic Programming and Nonmonotonic Reasoning (LPNMR 2015), LNAI, Vol.9345, pp.112-126, Springer, 2015. DOI: 10.1007/978-3-319-23264-5\_10. 査読有

他 3 編

〔学会発表〕(計 27 件)

(P1) 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. 第 29 回 RAMP シンポジウム, 筑波大学春日キャンパス春日講堂 (茨城県・つくば市春日), 2017 年 10 月 12 日. 招待講演

(P2) 坡山直樹, 飯野有軌, 番原睦則, 田村直之. 解集合プログラミングを用いた 3 次元ナンバーリンクソルバー. DA シンポジウム 2017, ADC-1, 情報処理学会システムと LSI の設計技術研究会, 山代温泉ゆのくに天祥 (石川県・加賀市), 2017 年 8 月 31 日.

(P3) 番原睦則. SAT から解集合プログラミングへ. 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 年度人工知能学会全国大会(第 31 回), ウィンクあいち (愛知県・名古屋市中村区名駅), 2017 年 5 月 23 日. 招待講演

(P4) 坡山直樹, 番原睦則, 宋剛秀, 田村直之. 制約充足問題の ASP 符号化に関する一考察. 2017 年度人工知能学会全国大会(第 31 回), ウィンクあいち (愛知県・名古屋市中村区名駅), 2017 年 5 月 23 日

(P5) 番原睦則. SAT ソルバーの進歩. 依頼シンポジウムセッション「組合せ最適化問題の発見的手法とその VLSI CAD への応用」, 2017 年電子情報通信学会総合大会, 名城大学天白キャンパス(愛知県・名古屋市中村区塩釜口), 2017 年 3 月 24 日. 招待講演

(P6) 坡山直樹, 川原征大, 迫龍哉, 番原睦則. 解集合プログラミングを用いたナンバーリンクの解法に関する一考察. DA シンポジウム 2016, 6A-1, 情報処理学会システムと

LSI の設計技術研究会, 山代温泉ゆのくに天祥 (石川県・加賀市), 2016 年 9 月 15 日

(P7) 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. 2016 年度人工知能学会全国大会(第 30 回), 北九州国際会議場(福岡県・北九州市), 2016 年 6 月 6 日. 全国大会優秀賞受賞

(P8) 兼行大将, 番原睦則, 宋剛秀, 田村直之, 井上克巳, 沖本天太. 解集合プログラミングを用いた制約組合せテストケース生成. 第 18 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 2016), ダイヤモンド瀬戸内マリンホテル(岡山県・玉野市), 2016 年 3 月 9 日

(P9) 川原征大, 宋剛秀, 番原睦則, 田村直之. SAT ソルバーを用いた高速な部分グラフ探索ツールの実装と評価. 日本ソフトウェア科学会第 32 回大会, 早稲田大学西早稲田キャンパス(東京都・新宿区大久保), 2015 年 9 月 9 日. 学生奨励賞

(P10) 兼行大将, 番原睦則, 宋剛秀, 田村直之, 井上克巳. 組合せテストケース生成問題に対する制約解集合プログラミングの適用. 2015 年度人工知能学会全国大会(第 29 回), 公立はこだて未来大学(北海道・函館市), 2015 年 5 月 31 日. 全国大会優秀賞受賞.

他 17 編

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

番原 睦則 (BANBARA, Mutsunori)  
神戸大学・情報基盤センター・准教授  
研究者番号: 80290774

### (2) 研究分担者

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

### (3) 研究分担者

宋 剛秀 (SOH, Takehide)  
神戸大学・情報基盤センター・助教  
研究者番号: 00625121

### (4) 連携研究者

井上 克巳 (INOUE, Katsumi)  
国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授  
研究者番号: 10252321