

令和元年6月10日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K16036

研究課題名(和文)ハイブリッド符号化を用いた高性能なSAT型制約プログラミングシステム

研究課題名(英文)High Performance SAT-based Constraint Programming System using Hybrid Encoding

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：制約充足問題(CSP)は、与えられた制約を満たす解を探索する問題である。CSPには産学問わず様々な応用があり、人工知能分野などにおける重要な研究課題となっている。本研究では、SATソルバーを用いた高性能なCSPを解くシステム(SAT型CPシステム)を実現するために、ハイブリッド符号化を用いた方法を研究開発した。結果として、国際競技会における優勝や、従来システムでは解けない問題を解くことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の意義は、SAT符号化の新しい方向性を開拓した点、既存のCPシステムでは求解困難な問題に対して、より高性能な推論基盤の候補を提供した点である。また重要な応用の1つとして、システム生物学やグラフ上の問題にも適用可能な多目的最適化問題への応用を示したことも挙げられる。CPシステムは様々な分野に应用される実用性が高いシステムであり、研究成果の産業分野への応用も期待できると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Constraint Satisfaction Problem (CSP) is a problem of finding an assignment that satisfies all the given constraints. CSP has various applications in both academia and industry and it is recognized as an important problem in the research area of Artificial Intelligence. In this research, we study a hybrid encoding method to realize a high performance CSP solving system using SAT solvers (SAT-based CP System). As a result, we succeeded in winning an international competition and solving problems that cannot be solved by existing systems.

研究分野：制約プログラミング

キーワード：SATソルバー SAT符号化 順序符号化 対数符号化 ハイブリッド符号化 制約充足問題 制約プログラミング

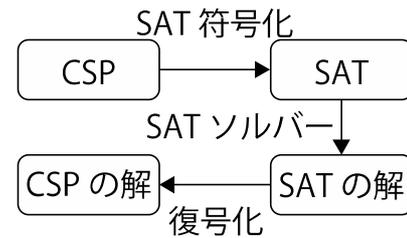
## 1. 研究開始当初の背景

### (背景)

命題論理の充足可能性判定 (SAT) 問題は 1970 年 Cook により初めての NP 完全性が証明された問題であり、計算機科学の中心的な課題である。SAT を解くプログラムである SAT ソルバーは、2000 年頃に提案された節学習や効率的なデータ構造により飛躍的に性能が向上している。

このような SAT ソルバーの性能向上を背景として、制約充足問題 (CSP)、システム検証、プランニング、定理証明など様々な問題に対して SAT ソルバーは推論基盤として利用されるようになった。特に CSP には産学問わず様々な応用があり、かつ、求解が困難な問題として、人工知能分野などにおける重要な研究課題となっている。

特に、右図に示す SAT 型制約プログラミングシステム SAT 型 CP システムは、プール式という素朴な入力しかもたない SAT ソルバーの求解性能をより幅広い実世界の問題へと応用するために不可欠なシステムである。SAT 型 CP システムは整数上の算術制約や論理式等で構成された制約充足問題および制約最適化問題 (以下、共に CSP と呼ぶ) を簡潔に表現できる高い記述性を備えながら、CSP から SAT への符号化 (SAT 符号化) により、SAT ソルバーを実行して高速に元の CSP の解を求解することができる。



SAT 型 CP システムは従来の CP システムと比較しても性能の高さが実証されており、代表的なシステム Sugar や、Opturion CPX はどちらも CSP ソルバー (CP システム) の国際競技会の複数部門で複数年連続優勝している。また Google 社で開発されている CP システム or-tools にも SAT ソルバーが組み込まれており、SAT 型 CP システムに対する注目が国際的に高まっている。このような SAT 型 CP システムでは SAT ソルバーに加えて、SAT 符号化が重要であり、SAT 符号化だけで計算時間が 100 倍以上異なることも珍しくない。

### (既存の SAT 符号化の問題点)

これまでに直接符号化、支持符号化、対数符号化、順序符号化など数多くの SAT 符号化が提案されてきたが、万能な符号化はなく、各符号化には効果的に符号化出来ない制約があるという問題点がある。例えば SAT 型 CP システムで最もよく利用される順序符号化は、規模の大きな制約に対して性能が悪い。この問題に対して二つの符号化をチャネリング制約によって融合するハイブリッド符号化が提案されているが、規模の大きな制約に対してはチャネリング制約自体が大きくなってしまい、うまく性能向上につながらなかった。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、複数の SAT 符号化を変数レベルで融合可能なハイブリッド SAT 符号化を実現し、それを実装した高性能な SAT 型 CP システムを研究開発することである。

本研究の独創的な点は、任意の SAT 符号化を変数レベルで融合することによってハイブリッド符号化するという新しい符号化の方法を実現する点である。本研究の結果として予想されるのは、任意の SAT 符号化の自動構成が可能なハイブリッド符号化の完成と、複雑かつ求解困難な CSP にも対応可能な SAT 型 CP システムの完成である。

本研究の意義は、SAT 符号化の新しい方向性を開拓できる点、既存の CP システムでは求解困難な問題に対して、より高性能な推論基盤を提供できる点である。ここまで記述した通り、CP システムは様々な分野に応用される実用性が高いシステムであり、研究成果の産業分野への応用も期待できる。

## 3. 研究の方法

具体的な研究課題は以下のように設定して研究を進める。研究課題と SAT 型 CP システムの研究開発は並行して進める。

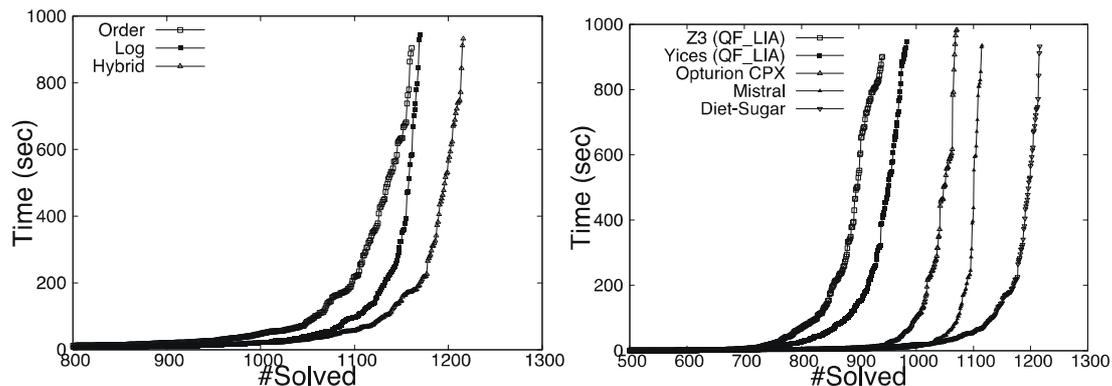
- (A) ハイブリッド符号化の理論的枠組みの研究と開発
- (B) ハイブリッド符号化の自動構成に関する研究と開発
- (C) 提案 SAT 型 CP システムの特長的なアプリケーションの研究と開発

(A) では複数の SAT 符号化を変数レベルで融合可能なハイブリッド SAT 符号化の理論的枠組みを研究し、(B) では、CSP が与えられた時に、どの変数をどの符号化方法で処理するのかを自動で決定する方法を研究する。これまで制約によって適切な符号化が異なることは知られているが、未だ未解明な部分も存在するため、(B) の研究課題では網羅的な CSP ベンチマークを使って制約と符号化の関係を詳細に解析する。その結果を用いて、ハイブリッド符号化を自動で構成する方法を研究する。(C) では、システム生物学やグラフ上の制約問題など研究開発した SAT 型 CP システムを使った実用的な応用研究を行う。

## 4. 研究成果

### 研究課題(A)と(B)に関する成果

研究課題 (A) について、複数の SAT 符号化を変数レベルで融合可能なハイブリッド符号化の理論的枠組みを研究し、実現した。また (B) の自動構成の方法として、標準化された CSP (線形比較の選言の連言で表現された CSP) における、線形比較に含まれる各変数のドメインの値の個数の積を元にした指標を用いた方法を研究し、実現した。以下の 2 つのグラフは国際論文誌 International Journal on Artificial Intelligence Tools で発表した論文「Proposal and Evaluation of Hybrid Encoding of CSP to SAT Integrating Order and Log Encodings」に掲載したハイブリッド符号化の性能を評価したものである [J3]。



左のグラフでは、単一の順序符号化、単一の対数符号化、それら 2 つを融合したハイブリッド符号化の性能を比較したものである。ハイブリッド符号化のグラフ(白抜きの上向三角)は、他の符号化のグラフより右にあり、これは順序符号化、対数符号化のどちらよりも性能が向上していることを表している。この他に、論文では、単一の符号化どちらでも解けない問題をハイブリッド符号化で解けるようになることを例示して示している。

右のグラフでは、ハイブリッド符号化を実装した SAT 型 CP システム「Diet-Sugar」と、他の最新の CP システムと SMT(背景理論付き SAT)ソルバーとの比較を 2009 年の CP システム競技会のベンチマークを用いて行っている。ハイブリッド符号化を実装した Diet-Sugar (白抜きの下向三角)がこのベンチマークにおいて他のソルバーより、性能が良いことが分かる。

さらに Diet-Sugar の後継にあたる SAT 型 CP システム sCOP を CP システムの国際的な競技会である 2018 XCSP3 Competition に参加登録した。XCSP3 Competition は、2005 年にその前身が始まった歴史のある競技会であり、欧米各国の教育研究機関で研究開発されたシステムが毎年参加している。sCOP はこの競技会のスタンダードソルバー-CSP 部門(逐次・並列)の 2 部門に登録し、結果として登録した両方の部門で優勝した [J2]。

### 研究課題(C)に関する成果

グラフに関する応用問題について複数の研究発表 [P1, P4, P5, P7, P12, P13, P14, P15] を行った。

またシステム生物学やグラフ上の制約問題では、「最も良い解」を単一の目的関数によって定義できず、複数の目的関数が必要になることがため、このような多目的制約最適化問題に対してハイブリッド符号化を適用する研究に取り組んだ。まず多目的制約最適化問題において、目的変数を順序符号化することでパレート最適解と符号化された SAT 問題における極小モデルが 1 対 1 に対応することを示した。次に、目的変数を順序符号化し、それ以外の変数を対数符号化するようにハイブリッド符号化を構成した。計算機実験の結果、提案方法を実装したシステムが既存方法を実装したシステムと競争的な結果を示すことが分かった。この研究成果について、「Solving Multiobjective Discrete Optimization Problems with Propositional Minimal Model Generation」と題した論文を国際会議 CP2017 において発表した [J4]。

### その他成果と受賞について

- CP システムの国際競技会 2018 XCSP3 Competition に参加し、2 部門優勝した [J2]。
- 本研究に関する研究成果も含んだ内容で「SAT ソルバーの最新動向と利用技術」と題した研究発表を「日本ソフトウェア科学会・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(PPL2017)」で行い、PPL2017 発表賞(一般の部)を受賞した [P9]。
- 本研究に関する研究成果も含んだ内容で「SAT 型制約プログラミングシステムと周辺技術」と題した解説論文を日本ソフトウェア科学会の雑誌コンピュータソフトウェアで発表し、解説論文賞を受賞した [J5]。
- 上述した業績も含め、合計 13 件の雑誌論文と 19 件の学会発表を行った。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

(J1)

宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之, 鍋島 英知.  
SAT ソルバーの最新動向と利用技術.  
コンピュータソフトウェア, 35(4): 72-92, 2018.  
(査読あり) [https://doi.org/10.11309/jssst.35.4\\_72](https://doi.org/10.11309/jssst.35.4_72)

(J2)

Takehide Soh, Daniel Le Berre, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura.  
sCOP: SAT-based Constraint Programming System.  
In Proceedings of XCSP3 Competition 2018, 93-94, 2018.  
(査読なし) [http://www.cril.univ-artois.fr/XCSP18/files/XCSP3\\_2018\\_Proceedings.pdf](http://www.cril.univ-artois.fr/XCSP18/files/XCSP3_2018_Proceedings.pdf)

(J3)

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, 26(1), 29 pages, 2017.  
(査読あり) <https://doi.org/10.1142/S0218213017600053>

(J4)

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), LNCS 10416, 596--614, 2017.  
(査読あり) [https://doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-66158-2_38)

(J5)

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.  
コンピュータソフトウェア, 34(1): 67--80, 2017.  
(査読あり) [https://doi.org/10.11309/jssst.34.1\\_67](https://doi.org/10.11309/jssst.34.1_67)

(J6)

Takahisa Toda, Takehide Soh. Implementing Efficient All Solutions SAT Solvers.  
Journal of Experimental Algorithmics, 21(1), 44 pages, 2016.  
(査読あり) <https://doi.org/10.1145/2975585>

他 7 件

〔学会発表〕(計 19 件)

(P1)

大野 周亮, 番原 睦則, 宋 剛秀, 田村 直之.  
alldifferent 制約のプール基数制約への符号化手法の提案とクイーングラフ彩色問題への応用.  
人工知能学会第 109 回人工知能基本問題研究会, 2019.

(P2)

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.  
The 28th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2018), 2018.

(P3)

南 雄之, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之.  
プール基数制約を経由した擬似プール制約の SAT 符号化手法.  
日本ソフトウェア科学会第 34 回大会, 2017.

(P4)

寸田 智也, 南 雄之, 宋 剛秀, 田村 直之.  
SAT 型制約ソルバーを用いた 3 次元ナンバーリンクの解法.  
DA シンポジウム 2017, 2017.

(P5)

寸田 智也, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之.  
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.  
人工知能学会全国大会(第 31 回), 2017.

(P6)

南 雄之, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之.  
プール基数制約を経由した擬似プール制約の SAT 符号化法.  
人工知能基本問題研究会(第 103 回), 人工知能学会研究会資料, SIG-FPAI-B506, 18--23, 2017.

(P7)

坡山 直樹, 川原 征大, 迫 龍哉, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之.  
解集合プログラミングを用いた多層ナンバーリンクの解法.  
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.

(P8)

吉玉 元和, 寸田 智也, 南 雄之, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之.  
SugarTracer: SAT 型制約ソルバー Sugar のトレースツール.  
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.

(P9)

宋 剛秀, 田村 直之.  
SAT ソルバーの最新動向と利用技術.  
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.

(P10)

田村 直之, 宋 剛秀, 番原 睦則.  
SAT ソルバーの使い方 -問題を SAT に符号化する方法-.  
第 58 回プログラミング・シンポジウム, 第 58 回プログラミング・シンポジウム予稿集, 165--172, 2017.

(P11)

宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之.  
Diet-Sugar: ハイブリッド SAT 符号化を実装した SAT 型制約ソルバー.  
第 58 回プログラミング・シンポジウム, 第 58 回プログラミング・シンポジウム予稿集, 71--74, 2017.

(P12)

寸田 智也, 南 雄之, 吉玉 元和, 宋 剛秀.  
SAT 型制約ソルバーを用いた多層ナンバーリンクの解法.  
DA シンポジウム 2016, 2016.

(P13)

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.

(P14)

川原 征大, 宋 剛秀, 番原 睦則, 田村 直之.  
SAT ソルバーを用いた部分グラフ探索のための制約モデル.  
2016 年度 人工知能学会全国大会, 2016.

(P15)

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, 2016.

他 4 件

〔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

sCOP: <https://tsoh.org/sCOP/>

Diet-Sugar: <https://tsoh.org/dsugar/>

6. 研究組織

なし

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。