

令和 5 年 6 月 11 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11748

研究課題名(和文) MDDを用いたSAT型CSPソルバーの高速化

研究課題名(英文) Acceleration of SAT-based CSP Solvers using MDD

研究代表者

宋 剛秀 (Soh, Takehide)

神戸大学・DX・情報統括本部・准教授

研究者番号：00625121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000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を解くシステムを実現するために、制約のMDD表現とSAT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入賞とシステムの高速化に成功した。また応用研究として生物学における細胞内で起こる遺伝子の相互作用のネットワークの数理モデルであるオートマタネットワークの定常状態の計算にSAT型解法を応用した。さらにハミルトン閉路問題のSAT型解法の提案も行った。

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CSPソルバー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。またシステム生物学における定常状態の解析への応用を示したことも貢献として挙げられる。CSPソルバー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と考えられる。

研究成果の概要(英文)：Constraint Satisfaction Problem (CSP) is a problem of finding assignments that satisfy given constraints. CSP has various applications across academia and industry, and it is an important research topic in fields such as artificial intelligence. In this study, we conducted research and development on methods using the MDD representation of constraints and SAT encoding to realize a high-performance CSP solving system using a SAT solver (SAT-based CSP solver). As a result, we achieved success in terms of winning in international competitions and speeding up the system. Additionally, we applied SAT-based solving methods to compute the steady state (attractor) of automata networks, which are mathematical models of gene regulatory networks occurring within cells in systems biology. Furthermore, we proposed a SAT-based solving method for the Hamiltonian cycle problem.

研究分野：情報学基礎

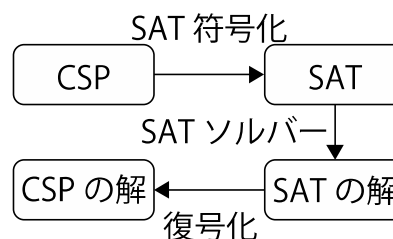
キーワード：SATソルバー SAT符号化 MDD 制約充足問題 制約プログラミング SAT (充足可能性判定問題) CSP (制約充足問題)

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、研究者個人に帰属します。

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 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、右図に示す SAT 型 CSP ソルバーは、命題論理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 CSP ソルバー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 CSP ソルバーは従来の SAT 型ではない CSP ソルバーと比較しても性能の高さが実証されており、近年の CSP ソルバー国際競技会における上位ソルバーの多くが SAT ソルバーを利用している。また Google 社で開発されている CSP ソルバー OR-Tools にも SAT ソルバーが組み込まれており、SAT 型 CSP ソルバーに対する注目が国際的に高まっていることが伺える。このような SAT 型 CSP ソルバーでは 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)

既存の問題点の 1 つとして、様々な種類の制約を直接 SAT へと変換する方法がとられてきたことが挙げられる。この方法では共通する変数や部分制約を共有することが難しいという問題があった。申請者は、これまで線形比較式を中間表現に用いることでこの問題にある程度対応してきた。しかし、それでも制約によっては新規変数や線形比較式の複雑な選言・連言になってしまい性能が良くならないという問題があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、SAT 型 CSP ソルバーの高速化である。対象問題となる CSP の制約は大きく分けて次の 3 種類である: i) 算術演算や論理演算等で構成される内包的制約, ii) 制約を満たす条件 (もしくは違反する条件) を変数の値の組の集合で陽に与えた外延的制約, iii) Alldifferent 等に代表されるグローバル制約。本研究では、これらに対する新しい符号化、具体的には「MDD (Multi-valued Decision Diagram) 制約を用いた CSP の各種制約の正規化」と、「MDD 制約の SAT 符号化」を研究開発する。

3. 研究の方法

本研究の目的である SAT 型 CSP ソルバーのさらなる高速化を実現するために、3 年計画で以下 3 つの研究課題に取り組む。

- (A) MDD 制約を用いた内包的制約, 外延的制約, グローバル制約の正規化の研究
- (B) MDD 制約の SAT 符号化の研究
- (C) 提案 SAT 型 CSP ソルバーの特長的なアプリケーションの研究開発

(A) MDD 制約を用いた各種制約の正規化の研究に加えて重要なのは、(B) の MDD 制約の SAT 符号化の研究開発である。MDD の特徴 (ノード数, パス数, 枝の数, 深さ) によって、最適な符号化は異なると考えられるため (B) の研究課題ではまず 3293 問で構成される網羅的な CSP ベンチマークを使って MDD と複数の符号化の関係を詳細に解析する。その上で、申請者がこれまで提案してきたハイブリッド符号化を MDD 制約に適用できるように拡張を試みる。

(A) と (B) の成果を統合して SAT 型 CSP ソルバーの高速化を研究開発する。

これら提案する各方法は申請者が開発している SAT 型 CSP ソルバー Fun-sCOP 上に実装する。(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 CSP ソルバー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) (B) について, 外延的制約を MDD によって表現し, SAT 符号化する方法を研究し, 実現した. この外延的制約の新しい符号化方法を, SAT 型 CSP ソルバー Fun-sCOP に実装し, CSP ソルバーの国際的な競技会である 2022 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. Fun-sCOP はこの競技会のスタンダードソルバーCSP 部門(逐次)に登録し, 結果として2位入賞した.

また MDD を線形比較制約に特化させた新しいデータ構造を研究し, 実現した. 内包的制約とグローバル制約については, この新しいデータ構造によって表現し SAT 符号化を行った. 以下のグラフは線形比較制約の既存 SAT 符号化との比較である.

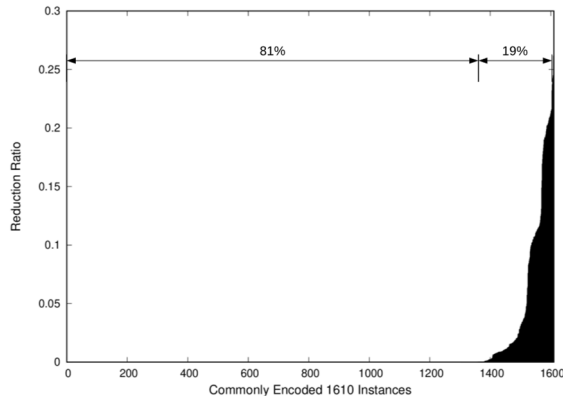


図1 既存方法からの節の削減率

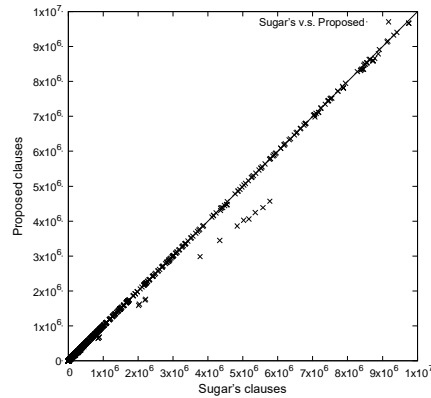
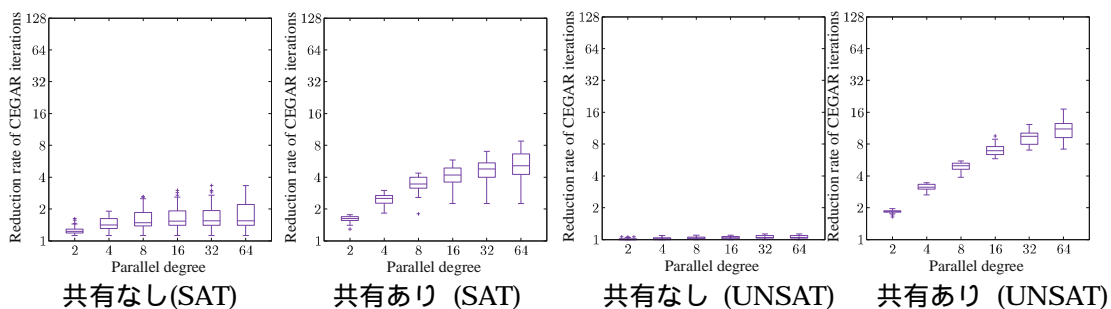


図2 既存方法との節数の比較

図1は既存のSAT型CSPソルバーSugarで採用されている線形比較制約の符号化節数と提案方法の節数の削減率を示したものである. 国際CSPソルバー競技会のベンチマークを用いて比較した結果, 19%の問題で節数の削減を確認し, もっとも大きいもので25%ほどの節を削減することができた. 図2は散布図による節数の比較である. いくつかの問題で顕著に節が少ないことがわかる. また時間割問題のベンチマークで計算時間が短縮されることも確認した. これらの評価は試作プログラムで行ったものであり, 今後 Fun-sCOP へ実装する予定である.

研究課題(C)に関する成果

2つの応用研究を行った. 1つめはハミルトン閉路問題への応用である. 以下はSAT型CSPソルバーを並列CEGAR手法でハミルトン閉路問題へ応用した結果の一部である. 提案方法では, CEGARにおいて生成される反例を各並列スレッド間で共有することで性能向上を確認することができた. また既存手法では解けない問題を解けることを確認した. この結果は査読付きの国際ワークショップPoS 2021において発表を行った.



共有なし(SAT) 共有あり(SAT) 共有なし(UNSAT) 共有あり(UNSAT)

図3 ハミルトン閉路問題に対するSAT型並列CEGARの性能向上の比較

2つめはシステム生物学における定常状態発見への応用である. 具体的には, 細胞内で起こる遺伝子の相互作用のネットワーク(遺伝子制御ネットワーク)の数理モデルの1つであるオートマタネットワークの定常状態(アトラクタ)の計算にSAT型解法を適用した. この解法により, 非同期なオートマタネットワークにおけるアトラクタを, SAT技術を用いた方法で高速に計算することが可能になった. 既存方法ではアトラクタの状態数が10程度になると計算が困難になったが, 提案方法は40程度まで計算が可能になり性能の改善に成功した. 得られた成果の一部は国際会議BIOINFORMATICSで”SAT-Based Method for Finding Attractors in Asynchronous Multi-Valued Networks”と題した国際共著の論文を発表した.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takehide Soh, Morgan Magnin, Daniel Le Berre, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura.	4. 巻 Volume 3: BIOINFORMATICS
2. 論文標題 SAT-based Method for Finding Attractors in Asynchronous Multi-valued Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 In Proceedings of the 16th International Joint Conference on Biomedical Engineering Systems and Technologies	6. 最初と最後の頁 163--174
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5220/0011675100003414	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Takehide Soh, Hidetomo Nabeshima, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura and Katsumi Inoue	4. 巻 なし
2. 論文標題 Towards CEGAR-based Parallel SAT Solving	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the Pragmatics of SAT Workshop 2021	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 足立啓一, 宋剛秀, 田村直之
2. 発表標題 ライフゲームを逆向きに動かす
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀岡真未, 宋剛秀, 田村直之
2. 発表標題 CDCL型SATソルバーの内部動作可視化ツール
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第38回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小菅脩司, 宋剛秀, 田村直之, 番原睦則
2. 発表標題 チャネリング制約を用いた alldifferent 制約の SAT 符号化
3. 学会等名 情報処理学会 第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑原和也, 宋剛秀, 田村直之, 番原睦則
2. 発表標題 解集合プログラミングを用いた優先度付き巨大近傍探索の実装と評価
3. 学会等名 情報処理学会 第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 三嶋哲平, 宋剛秀, 田村直之
2. 発表標題 SATソルバーを用いた一層平面配置配線問題の解法に関する考察
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第37回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯野有軌, 田村直之, 宋剛秀, 番原睦則, 井上克巳
2. 発表標題 解集合プログラミングによる様相命題論理Kの充足可能性判定
3. 学会等名 2020年度人工知能学会全国大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

宋 剛秀 (業績, ソフトウェアへのリンク)
<https://tsoh.org/>
sCOP: a SAT-based CP System
<https://tsoh.org/sCOP/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
フランス	CRIL, CNRS	Ecole Centrale de Nantes		