

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24300007

研究課題名(和文) 命題論理の推論技術を用いた高性能かつ柔軟な制約プログラミングシステムの実現

研究課題名(英文) Realization of High-Performance and Flexible Constraint Programming Systems Using Propositional Inference Techniques

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) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：制約プログラミングは、組合せ問題の解法を陽にプログラムすることなく、知的なソフトウェア・システムを実現するためのパラダイムである。本研究では、近年になって性能が大幅に向上した命題論理の推論技術を用い、高性能かつ柔軟な記述が可能な制約プログラミングシステムの研究開発を行った。開発したシステムは、インターネットを通じて公開している。また、開発したシステムをコース時間割問題、テストケース生成問題、パッキング配列問題、ハミルトン閉路問題、回路配線問題、システム生物学などの様々な困難な問題に応用し、既存研究よりも優れた結果を得た。

研究成果の概要(英文)：Constraint programming is a paradigm for realizing intelligent software systems without explicitly programming the solving algorithm of combinatorial programs. In this research project, we studied and developed high-performance and flexible constraint programming systems by using propositional inference techniques which made big performance progress in recent years. The developed systems are published through the Internet. We also applied the developed systems to various difficult problems (such as course timetabling, test case generation, packing array construction, Hamilton cycle finding, circuit wiring, and systems biology) and obtained superior results compared with previous works.

研究分野：情報学・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

1. 研究開始当初の背景

(1) **SAT 技術の成功:** 命題論理の充足可能性判定問題である SAT は、1960 年代の Davis による解法アルゴリズムの提案、1970 年の Cook による NP 完全性の証明など、計算機科学の中心的課題であった。また、SAT を解くアルゴリズムおよびそれを実装したソルバーに関して、半世紀前からこれまでに膨大な量の研究がなされてきた。こうした多くの努力が結実し、最近の十数年で SAT ソルバーの性能は飛躍的に向上した。特に、SAT ソルバーの性能を競争する国際的な競技会が毎年開催され、SAT ソルバーの性能向上に寄与している。このような SAT ソルバーの性能向上を背景として、現在では、システム検証、プランニング、定理証明などの数多くの問題に対し、SAT は推論の基盤技術として広く利用され、国内外の大学や企業で活発に研究・応用が進められており、CPU の演算回路の検証などに実際に用いられている。

(2) **SAT 型制約プログラミングシステムの成功と限界:** 制約充足問題および制約最適化問題(以下まとめて CSP と呼ぶ)は、与えられた制約条件を満たす解あるいは最適解を探索する問題である。制約プログラミングシステムは、CSP の記述言語(制約モデリング言語)およびそれを求解するソルバー(制約ソルバー)からなるソフトウェアシステムである。研究代表者らは SAT 技術を用いた SAT 型制約プログラミングシステムである Sugar を開発し、後述のように既存の制約プログラミングシステムを凌ぐ世界最高速の性能を得た。Sugar は、与えられた CSP を SAT に符号化(encode)した後、高速な SAT ソルバーを用いて解を探索し、SAT ソルバーの解から元の CSP の解を得る方法を用いている。Sugar に代表される SAT 型制約プログラミングシステムは、SAT 技術の発展に裏付けられ、CSP の求解に関して高い性能を実現しているが、以下のような限界も存在していた。

フレキシブル制約への対応:

必ずしも満たさなくて良いソフト制約への対応が不十分である。

動的な制約変更への対応:

動的な制約の追加や削除への対応がなされていない。

ドメインの拡張:

実数や記号等の整数以外のドメインへの対応がなされていない。

2. 研究の目的

(1) SAT 型制約プログラミングシステムの研究開発を進展させ、ソフト制約への対応、動的な制約の追加・削除への対応、実数ドメイン上や記号ドメイン上の制約への対応などを行い、高性能かつ柔軟な制約プログラミングシステムを実現するものであり、既存 SAT 技

術では解くことが困難あるいは不可能だった応用に対し高性能な推論基盤を提供することが目的である。

3. 研究の方法

(1) 以下の 4 つの研究テーマを設定し、研究を行った。

A. フレキシブル制約に関する研究開発: 必ずしも満たさなくても良いソフト制約を含む問題の SAT 符号化に関し研究開発を行う。研究代表者らが開発した前述の Sugar は、2008 年の制約ソルバー競技会中の Max-CSP に対する 4 部門においても第一位の成績をおさめた Max-CSP は全制約がソフト制約であり、充足する制約の個数を最大化する問題である。本研究では、この方法を発展させ、ソフト制約とハード制約が混合されている部分 Max-CSP、およびソフト制約にコストを表す重みが付与されている重み付き CSP に対する SAT 符号化の手法を確立する。

B. 動的な制約変更に関する研究開発: 動的に制約が追加・削除される問題に対し、SAT 符号化をインクリメンタルに行い効率よく求解する手法について研究開発を行う。既存 SAT 技術の一つとして知られているインクリメンタル解法を適用し、さらに発展させることで、動的な制約変更を含む問題に対する SAT 符号化の手法を確立する。

C. ドメイン拡張に関する研究開発: SAT 型制約プログラミングシステムの既存研究は、整数の有限領域を主な対象としてきた。本テーマでは、実数ドメインおよび記号ドメインに対する SAT 符号化の手法を確立する。

D. 応用研究開発: 混合整数計画問題、システム検証、プランニング問題、スケジューリング問題、システム生物学への応用について応用研究開発を行い、本研究課題で開発する制約プログラミングシステムについて評価する。

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. フレキシブル制約に関する研究開発: 部分 Max-CSP および重み付き CSP の SAT 符号化について研究開発を行い、Sugar に実装した。特に、フレキシブル制約の SAT 符号化で重要となる擬似プール制約の符号化について研究開発を行った。さらに、多目的(分散)制約最適化問題における効率的かつ高速な完全および近似解法について研究を行い、成果を発表した。また、最適解探索手法として注目されている充足不能コアに関し、SAT モデル

の復号化処理に基づいて高レベル充足不能コアを求めるための簡易な抽出手法を考案・実装した。(論文 発表)

B. 動的な制約変更に関する研究開発: SAT ソルバーの求解中に動的に制約を単純化する手法として、学習節の導出過程で高速に包摂検査を行う手法と、リテラルブロックをそれを含意するリテラルと置換する手法を考案し、SAT ソルバーに実装した。また、動的な制約追加と削除を可能にした SAT 型制約プログラミングシステム Copris および Scarab を開発し、その成果を発表した。Copris および Scarab は Scala 言語上のドメイン特化言語として実現されており、様々な問題を柔軟に制約モデル化できるという特長を持っている。(論文 発表)

C. ドメイン拡張に関する研究開発: 実数の SAT 符号化を目的として、巨大な整数を符号化するためコンパクト順序符号化を考案し、SAT 型制約ソルバー Azucar として実装した。また、記号制約と算術制約が混合した問題を取り扱うため、SAT 符号化手法を統合した制約解集合プログラミング(CASP)システムを実現するための手法について研究を行い、そのシステムとして muffine, aspartame を開発・評価した。(論文)

D. 応用研究開発: 上記で研究開発したシステムを使用し、コース時間割問題、テストケース生成問題、パッキング配列問題、ハミルトン閉路問題、回路配線問題、システム生物学への応用研究を行った。これらの応用研究について、既存研究で用いられているベンチマーク問題などを用いて評価した所、既存研究の手法よりも優れた結果を得た。(論文 発表 著書)

(2) 雑誌論文 49 件, 学会発表 45 件, 図書 1 件により研究成果を発表した。うち学会論文賞 1 件(論文), 研究会論文賞 1 件(発表), 大会奨励賞 2 件(発表), 招待講演 1 件(発表)が含まれる。また、情報処理学会 SLDM 研究会の 2014 年アルゴリズム・デザイン・コンテストにおいて、研究代表者らが開発したソフトウェアが最優秀賞を受賞した。

(3) 以下の研究開発したソフトウェアを公開している: Sugar, Copris, Azucar, Scarab, GlueMiniSat, aspartame.

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 49 件)

則武治樹, 番原睦則, 宋剛秀, 田村直之, 井上克巳, パッキング配列問題の制約モデリングと SAT 符号化, コンピュータソフトウエ

ア, 査読有, Vol.31(1), 2014, 116-130, DOI:10.11309/jssst.31.1_116.

Takehide Soh, Daniel Le Berre, Stéphanie Roussel, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, Incremental SAT-based Method with Native Boolean Cardinality Handling for the Hamiltonian Cycle Problem., Proceedings of the 14th European Conference on Logics in Artificial Intelligence (JELIA 2014), 査読有, Vol.8761, 2014, 684-693, DOI:10.1007/978-3-319-11558-0_52.

丹生智也, 田村直之, 番原睦則, 位取り記数法に基づく整数有限領域上の制約充足問題のコンパクトかつ効率的な SAT 符号化, コンピュータソフトウェア, 査読有, Vol.30・1, 2013, 211-230, DOI:10.11309/jssst.30.1_211.

Naoyuki Tamura, Mutsunori Banbara, Takehide Soh, PBSugar: Compiling Pseudo-Boolean Constraints to SAT with Order Encoding, Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2013), 査読有, 2013, 1020-1027, DOI:10.1109/ICTAI.2013.153.

Takehide Soh, Naoyuki Tamura, Mutsunori Banbara, Scarab: A Rapid Prototyping Tool for SAT-based Constraint Programming Systems, Proceedings of the 16th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2013), 査読有, Vol.7962, 2013, 429-436, DOI:10.1007/978-3-642-39071-5_34.

Hidetomo Nabeshima, Koji Iwanuma, Katsumi Inoue, On-The-Fly Lazy Clause Simplification based on Binary Resolvents, Proceedings of the 25th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2013), 査読有, 2013, 987-995, DOI:10.1109/ICTAI.2013.149.

Mutsunori Banbara, Martin Gebser, Katsumi Inoue, Torsten Schaub, Takehide Soh, Naoyuki Tamura, Matthias Weise, Aspartame: Solving Constraint Satisfaction Problems with Answer Set Programming, Proceedings of the Sixth Workshop on Answer Set Programming and Other Computing Paradigms (ASPOCP 2013), 査読有, 2013, 33-48.

Mutsunori Banbara, Takehide Soh, Naoyuki Tamura, Katsumi Inoue, Torsten Schaub, Answer Set Programming as a Modeling Language for Course Timetabling, Theory and Practice of Logic Programming, 査読有, Vol.13(4-5), 2013, 783-798, DOI:10.1017/S1471068413000495.

鍋島英知, 岩沼宏治, 井上克巳, GlueMiniSat2.2.5: 単位伝搬を促す学習節の

積極的獲得戦略に基づく高速SATソルバー，コンピュータソフトウェア，査読有，Vol.29・4，2012，146-160，DOI:10.11309/jssst.29.4.146 (日本ソフトウェア科学会 第3回ソフトウェア論文賞)。

田村直之，丹生智也，番原睦則，Scala上の制約プログラミング用ドメイン特化言語Coprissについて，コンピュータソフトウェア，査読有，Vol.29・4，2012，114-129，DOI:10.11309/jssst.29.4.114。

Tomoya Tanjo, Naoyuki Tamura, Mutsunori Banbara, Azucar: A SAT-Based CSP Solver Using Compact Order Encoding, The 15th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2012), 査読有，Vol.7317，2012，456-462，DOI:10.1007/978-3-642-31612-8_37。

Takehide Soh, Katsumi Inoue, Tomoya Baba, Toyoyuki Takada, Toshihiko Shiroishi, Evaluation of the Prediction of Gene Knockout Effects by Minimal Pathway Enumeration, International Journal on Advances in Life Sciences, 査読有，Vol.4・3-4，2012，154-165。

Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, Katsumi Inoue, Generating Event-Sequence Test Cases by Answer Set Programming with the Incidence Matrix, The 28th International Conference on Logic Programming (ICLP 2012), 査読有，2012，86-97，DOI:10.4230/LIPIcs.ICLP.2012.86。

Tenda Okimoto, Yongjoon Joe, Atsushi Iwasaki, Toshihiro Matsui, Katsutoshi Hirayama, Makoto Yokoo, Interactive Algorithm for Multi-Objective Constraint Optimization, The 18th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2012), 査読有，2012，561-576，DOI:10.1007/978-3-642-33558-7_41。

〔学会発表〕(計45件)

渡辺大樹，鍋島英知，SAT変換手法における充足不能コアの抽出，人工知能学会第97回人工知能基本問題研究会，2015年3月23日，別府国際コンベンションセンター(大分県)。

田村直之，SAT Solver and its Application to Combinatorial Problems，実験計画法およびその周辺の組合せ構造2014，2014年12月14日，城崎国際アートセンター(兵庫県)(招待講演)。

宋剛秀，番原睦則，田村直之，Scala上で実現されたSAT型制約プログラミングシステムのための開発ツール，日本ソフトウェア科学会第31回大会，2014年9月9日，名古屋大学(愛知県)(日本ソフトウェア科学会第31回大会高橋奨励賞)。

田村直之，宋剛秀，番原睦則，鍋島英知，

SAT型制約ソルバーを用いたナンバーリンクの解法，情報処理学会DAシンポジウム2014，2014年8月29日，水明館(岐阜県)(情報処理学会SLDM研究会優秀論文賞)。

Hidetomo Nabeshima, Koji Iwanuma, Katsumi Inoue, GlueMiniSat 2.2.7: On-The-Fly Lazy Clause Simplification, The 16th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2013), 2013年7月12日，University of Helsinki (Finland)。

Naoyuki Tamura, Takehide Soh, Mutsunori Banbara, Katsumi Inoue, CSPSAT Projects and their SAT Related Tools, The 16th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2013), Combined tool demo and poster session, 2013年7月11日，University of Helsinki (Finland)。

鈴江美奈，田村直之，番原睦則，宋剛秀，鳩野逸生，カリキュラムベースのコース時間割問題の擬似プール最適化問題への符号化，日本ソフトウェア科学会第29回大会，2012年8月24日，法政大学(東京都)(日本ソフトウェア科学会第29回大会学生奨励賞受賞)。

〔図書〕(計1件)

Luis Fariñas del Cerro, Katsumi Inoue (editors), Logical Modeling of Biological Systems, Wiley, 2014, 422 pages.

〔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

CSPSAT2 プロジェクト:

<http://www.edu.kobe-u.ac.jp/istc-tamlab/cspsat/Sugar>:

<http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/sugar/>

Copriss:

<http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/copriss/>

Azucar:

<http://code.google.com/p/azucar-solver/>

Scarab:

<http://kix.istc.kobe-u.ac.jp/~soh/scarab/>

GlueMiniSat:

<https://sites.google.com/a/nabelab.org/glue-minisat/>

aspartame:

<http://potassco.sourceforge.net/labs.html>

6. 研究組織

(1) 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

(2)研究分担者

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

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

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

鍋島 英知 (NABESHIMA, Hidetomo)
山梨大学・医学工学総合研究部・准教授
研究者番号：10334848

(3)連携研究者

丹生 智也 (TANJO, Tomoya)
情報・システム研究機構 新領域融合研究セ
ンター・融合プロジェクト特任研究員
研究者番号：40635067

沖本 天太 (OKIMOTO, Tenda)
情報・システム研究機構 新領域融合研究セ
ンター・融合プロジェクト特任研究員
研究者番号：10632432