

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 21 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2008～2011

課題番号：20240003

研究課題名（和文） 制約最適化問題のSAT変換による解法とその並列分散処理に関する研究

研究課題名（英文） Study of SAT-based constraint optimization problem solving and its parallel distributed processing

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

研究成果の概要（和文）：制約充足および最適化問題に対するSAT技術と、その並列分散実装に関する研究を進め、105件の雑誌論文公表、67件の学会発表を行った。また、世界をリードするソフトウェアを開発した。2008年と2009年のCSPソルバー競技会 グローバル制約部門優勝のSugar、2011年SAT競技会 応用UNSAT部門優勝のGlueMiniSat、2010年と2011年のMax-SAT競技会 部分Max-SAT応用部門優勝のQMaxSAT。

研究成果の概要（英文）：We conducted the research on SAT technologies for Constraint Satisfaction and Optimization Problems and their parallel/distributed implementations, and published 105 refereed papers and made 67 presentations. In addition, world's leading softwares were developed including a SAT-based CSP/COP solver Sugar which won at the 2008 and 2009 CSP Solver Competitions in global constraint categories, a CDCL type SAT solver GlueMiniSat which won at the 2011 SAT Competition in Applications UNSAT category, and a partial Max-SAT solver QMaxSAT which won at the 2010 and 2011 Max-SAT evaluation in Application category.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	10,500,000	3,150,000	13,650,000
2009年度	9,200,000	2,760,000	11,960,000
2010年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
2011年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
総計	36,500,000	10,950,000	47,450,000

研究分野：計算機科学

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：SAT, 制約最適化問題, 並列処理・分散処理

1. 研究開始当初の背景

(1) 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。

CSPは、近年のSCMやERP等に代表される企業経営最適化を始めとした様々な産業分野に応用されているだけでなく、求解が非常に困難（NP困難）な問題としてソフトウェアにおける重要な研究課題となっており、欧米を中心として活発に研究が進められてた。

(2) 一方、近年になって命題論理の充足可能性判定問題（SAT問題）を解くための高速なSATソルバーが実現されたことを契機として、スケジューリング問題、プランニング問題、ハードウェア検証、ソフトウェア検証等の問題をSAT問題に変換して解くSAT変換（SAT符号化）の研究が盛んになり、大きな成功をおさめていた。

## 2. 研究の目的

CSPを対象としてSAT変換（SAT符号化）に基づく並列SATソルバーによる解法に着目し、実用的規模の問題を高速に解くための手法の研究、実証ソフトウェアの開発、および評価を目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 研究テーマとして「A. SAT変換の研究」、「B. SATソルバーの研究」、「C. 共有メモリ型並列ソルバーの研究」、「D. 分散型並列ソルバーの研究」、「E. 総括（評価）」を設定し、各研究テーマを担当するWGを組織した。

(2) 12回の全体会合（CSPSAT研究会）の実施（発表152件、参加277名）、3回の講演会（CSPSAT講演会）を実施（発表20件、参加46名）し、プロジェクト全体の研究を推進した。

(3) 国内における該当分野の研究レベル向上のため、学会活動を積極的に行った。

## 4. 研究成果

(1) 研究発表：105編の雑誌論文（査読有の国際会議論文を含む）、67件の学会発表（うち3件の招待講演）を行った。

(2) SAT型CSPソルバーSugarの研究開

発：新しいSAT符号化方法である順序符号化を用いたCSPソルバーを開発した。Sugarは2008、2009年の国際CSPソルバー競技会において2年連続で優勝し（Global制約の全部門）、2008年の国際Max-CSPソルバー競技会で優勝した（整数制約、Global制約部門）。

(3) SATソルバーGlueMiniSatの研究開発：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ソルバーであるGlueMiniSatを開発した。GlueMiniSatは2011年のSAT競技会で優勝し（応用UNSAT部門）、並列部門でも準優勝の成績を収めた。

(4) Max-SATソルバーQMaxSATの研究開発：部分Max-SAT問題をインクリメンタルにSAT問題に符号化し求解するQMaxSATを開発した。QMaxSATは2010、2011年のMax-SAT evaluationで優勝した（部分Max-SAT産業部門）。

(5) 並列SATソルバーの研究開発：並列SATソルバーとしてc-satなど複数の並列SATソルバーを開発した。特にc-satは31PEでの並列実行で23倍以上の速度向上を得た。

(6) 分散CSPアルゴリズムの研究開発：分散CSPアルゴリズムに関する研究開発を行い、特に提携構造形成問題とメカニズムデザインについて優れた研究成果を得た。

(7) 動的CSPおよび動的SATのアルゴリズムの研究開発：値変更コスト付き動的CSPおよび動的SATに関しラグランジュ分解に基づく新しい解法を提案・評価し、優れた研究成果を得た。

(8) SAT技術の応用研究開発：SAT技術の応用として、次の問題について既知の最良解を更新するなど、新しい結果を得た：ジョブショップ・スケジューリング、オープンショップ・スケジューリング、テストケース自動生成、2次元パッキング問題、準群の存在問題、システム生物学。

(9) 学会活動：人工知能学会誌における特集「最近のSAT技術の発展」の共同執筆、人工知能学

会全国大会でのオーガナイズド・セッション「SAT技術の理論, 実装, 応用」の企画・実施を行った。

#### 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12件) (総計105件)

- 1) 鍋島 英知, 岩沼 宏治, 井上 克巳, G l u e M i n i S a t 2.2.5: 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, 掲載決定, 2012.
- 2) 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Coprisについて, コンピュータソフトウェア, 査読有, 掲載決定, 2012.
- 3) M. Koshimura, T. Zhang, H. Fujita, R. Hasegawa, QMaxSAT: A Partial Max-SAT Solver, Journal on Satisfiability, Boolean Modeling and Computation, 査読有, Vol. 8, pp. 95-100, 2012.
- 4) 波多野 大督, 平山 勝敏, 値変更コスト付き動的SATの定式化とその解法, 人工知能学会論文誌, 査読有, 26巻, 6号, pp. 682-691, 2011.
- 5) 沖本 天太, ジョ ヨンジョン, 岩崎 敦, 横尾 真, 擬似木に基づく分散制約最適化問題の精度保証付き非厳密解法の提案, 情報処理学会論文誌, 査読有, 52巻, 12号, pp. 3786-3795, 2011.
- 6) T. Tanjo, N. Tamura, M. Banbara, A Compact and Efficient SAT-Encoding of Finite Domain CSP, Proc. of 14th Int'l Conf. on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2011), 査読有, pp. 375-376, 2011.
- 7) 田村 直之, 丹生 智也, 番原 睦則, SAT変換に基づく制約ソルバーとその性能評価, コンピュータソフトウェア, 査読有, 27巻, pp. 183-196, 2010.
- 8) M. Koshimura, H. Nabeshima, H. Fujita, R.

Hasegawa, Solving Open Job-Shop Scheduling Problems by SAT Encoding, IEICE Trans. on Information and Systems, 査読有, Vol. E93-D, pp. 2316-2318, 2010.

- 9) T. Soh, K. Inoue, N. Tamura, M. Banbara, H. Nabeshima, A SAT-based Method for Solving the Two-dimensional Strip Packing Problem, Fundamenta Informaticae, 査読有, Vol. 102, pp. 467-487, 2010.
- 10) Y. Yamamoto, K. Inoue, K. Iwanuma, From Inverse Entailment to Inverse Subsumption, Proc. of 20th Int'l Conf. on Inductive Logic Programming (ILP 2010), 査読有, 2010.
- 11) 松井 俊浩, M. C. Silaghi, 平山 勝敏, 横尾 真, 松尾 啓志, 分散制約最適化問題へのソフトウェア統合の適用, 人工知能学会論文誌, 査読有, 25巻, pp. 410-422, 2010.
- 12) N. Tamura, A. Taga, S. Kitagawa, M. Banbara, Compiling Finite Linear CSP into SAT, Constraints, 査読有, Vol. 27, pp. 254-272, 2009.

[学会発表] (計5件) (総計67件)

- 1) 田村 直之, 丹生 智也, 番原 睦則, SAT型制約ソルバーSugarについて (招待講演), 第81回人工知能学会人工知能基本問題研究会, 2011年1月31日, 山梨大学.
- 2) N. Tamura, T. Tanjo, M. Banbara, Solving Constraint Satisfaction Problems by a SAT Solver (招待講演), Joint Workshop on Implementation of Constraint Logic Programming Systems and Logic-based Methods in Programming Environments, 2010年7月15日, Edinburgh (Scotland).
- 3) N. Tamura, T. Tanjo, M. Banbara, Solving Constraint Satisfaction Problems with SAT Technology (招待講演), 10th Int'l Symp. on Functional and Logic Programming, 2010年4月19日, 東北大学 (宮城県).
- 4) K. Ohmura, K. Ueda, c-sat: A Parallel SAT

Solver for Clusters, 12th Int'l Conf. on Theory and Applications of Satisfiability Testing

(SAT 2009), 2009年7月3日, Swansea (Wales).

5) 高見 明秀, 鍋島 英知, 岩沼 宏治, 並列分散型SATソルバにおける探索空間の分割手法の提案, 電子情報通信学会 IEICE-SS-444, 2009年3月2日, 佐賀大学.

[その他]

ホームページ等

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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田村 直之 (TAMURA NAUYUKI)

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・准教授

研究者番号: 80290774

平山 勝敏 (HIRAYAMA KATSUTOSHI)

神戸大学・海事科学研究科・准教授

研究者番号: 00273813

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

岩沼 宏治 (IWANUMA KOJI)

山梨大学・医学工学総合研究部・教授

研究者番号: 30176557

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

山本 泰生 (YAMAMOTO YOSHITAKA)

山梨大学・医学工学総合研究部・助教

研究者番号: 30550793

横尾 真 (YOKOO MAKOTO)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号: 20380678

長谷川 隆三 (HASEGAWA RYUZO)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号: 20274483

藤田 博 (FUJITA HIROSHI)

九州大学・システム情報科学研究院・准教授

研究者番号: 70284552

越村 三幸 (KISHIMURA MIYUKI)

九州大学・システム情報科学研究院・助教

研究者番号: 30274492

### (3) 連携研究者

上田 和紀 (UEDA KAZUNORI)

早稲田大学・理工学術院情報理工学科・教授

研究者番号: 10257206