

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19700025

研究課題名（和文）Prolog 処理系を用いた複数 SAT ソルバ並列実行システム

研究課題名（英文）A Prolog-Based Parallel Execution System for Multiple SAT Solvers

研究代表者

番原 睦則 (BANBARA MUTSUNORI)

神戸大学・学術情報基盤センター・准教授

研究者番号：80290774

研究成果の概要（和文）：

論理プログラミング・システム上で、複数の SAT ソルバーを並行動作させる ハイブリッド型 SAT ソルバーに関する研究を行った。組合せテストのテストケース生成問題をベンチマークとして、複数の SAT ソルバーを用いて求解した結果、最適値が未知であった問題(3問)について、既知の上限が最適値であることを証明することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We have studied a parallel execution system of multiple SAT solvers on a Java-based logic programming system. To evaluate our approach, we used the test case generation problems of combinatorial testing as benchmarks. In our experiments, we succeeded in proving the optimality of known bounds for three problems.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	800,000	0	800,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,700,000	570,000	3,270,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：Prolog, SAT, 制約充足問題

## 1. 研究開始当初の背景

命題論理の充足可能性判定問題(SAT)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 は人工知能および計算機工学における最も基本的な問題として、論理合成、システム検証、プランニング問題、スケジューリング問題、制約充足問題、制約最適化問題、定理証明など、さまざまな分野

に応用されている。

近年 SAT 問題を解く SAT ソルバーの性能が飛躍的に向上したことに伴い、元の問題を SAT 問題に符号化し (SAT 符号化), SAT ソルバーを用いて求解する研究が注目を集めている。特に、最適化問題を SAT 符号化を用いて解く場合、充足可能 (SAT) と充足不能 (UNSAT) の両方を含む複数の SAT 問題を解く必要がある。

しかしながら、各 SAT ソルバーには得意な問題と不得意な問題があり、充足可能 (SAT) と充足不能 (UNSAT) の両方を効率的に解く、普遍的な単体 SAT ソルバーを開発することは難しい。

本研究で提案する「複数の SAT ソルバー並列実行システム」は、この問題を解決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

本研究の目的は、複数の SAT ソルバーを並行動作させ、単体の SAT ソルバーをチューニングする以上の効果を得ることである。具体的には、複数の SAT ソルバーを並行動作させるハイブリッド型 SAT ソルバーの設計・実装を目的とし、以下の項目について研究を進める。

(1) Prolog から Java へのトランスレータ処理系 Prolog Cafe の拡張

① Prolog から Java への新しいトランスレータ方法の設計・実装

② Prolog Cafe のための Eclipse プラグインの設計・実装

(2) ハイブリッド型 SAT ソルバーの設計・実装

① SAT ソルバー並列実行のための Prolog Cafe インタフェイスの設計・実装

② 並列実行のためのスケジューラの設計・実装

(3) 組合せテストのテストケース自動生成問題への応用

## 3. 研究の方法

「研究の目的」で示した各項目について、その研究方法を述べる。

まず(1)では、Prolog から Java へのトランスレータ処理系 Prolog Cafe を拡張し、ハイブリッド型 SAT ソルバーを開発するためのプラットフォームを整備する。研究代表者・番原が開発した Prolog Cafe は 100%純 Java で実装されており、移植性・拡張性の高い処理系である。既にマルチスレッド化されており、ゴールの並列実行も可能である。

(1)-①では、Prolog の節を Java のメソッドに変換する新しいトランスレータ方法に関する研究を行う。また、(1)-②では、Prolog Cafe の利便性を向上させるため、広く普及している統合開発環境 Eclipse のプラグインの研究を行う。

つぎに(2)では、Prolog Cafe をベースに、ハイブリッド型 SAT ソルバーの研究を行う。SAT ソルバーとしては、系統的 SAT ソルバーである MiniSat, 確率的 SAT ソルバーである UBCSAT を用いた。

最後に(3)では、ハイブリッド型 SAT ソルバーの適用が期待される応用問題として、組合せテストのテストケース生成問題を取り上げる。組合せテストはソフトウェアのテスト手法の一つであり、近年ソフトウェア工学、組合せデザイン理論の分野において、活発に研究が行われている。

## 4. 研究成果

各研究項目について、その研究成果について述べる。

まず(1)では、Prolog を Java へ変換する手法として、節をメソッドに変換する新しいトランスレータ方法を提案した。この新しい方法を用いて、Prolog Cafe バージョン 1.2 を実装した。また同時に、これまで未実装であった 2 次インデキシング、組込み述語のインライン展開による最適化を実装し、Prolog Cafe の実行効率の改善を実現した。開発した Prolog Cafe システムは、<http://kaminari.istc.kobe-u.ac.jp/PrologCafe/> に公開中である。

次に(2)では、Prolog Cafe から SAT ソルバーを呼び出すための組込み述語を設計・実装した。そして、この機能と Prolog Cafe のマルチスレッド実行機能を使って、ハイブリッド型 SAT ソルバーの開発を進めた。しかしながら、現時点ではプロトタイプ・システムの開発に留まっている。

最後に(3)では、ハイブリッド型 SAT ソルバーの適用が期待される問題として、組合せテストのテストケース生成問題を取り上げ、以下の研究成果を得た。

① テストケース生成問題を SAT 問題へ変換・コンパイルする新しい SAT 符号化を考案した。この SAT 符号化は、順序符号化法と呼ばれる制約充足問題から SAT 問題への SAT 符号化法に基づいている。

② SAT 符号化されたテストケース生成問題に対して、系統的 SAT ソルバーと確率的 SAT ソルバーの両方を用いた実行実験を行った。その結果、これまで最適値が未知であった 3 問、CAN(3, 12, 2), CAN(3, 13, 2), CAN(3, 14, 2) について、既知の上限が最適値であることを

証明することができた.

最適値を決定した問題のうち, 我々が得た結果  $CAN(3, 12, 2)=15$  は, 2009 年に出版された『Handbook of Satisfiability (IOS Press)』でも未解決問題として挙げられている求解困難な問題であった. 以下に最適値を決定できたテストケース例  $CA(15;3, 12, 2)$  を示す.

```
000000000000
000000111111
000111000111
001011011001
001101101010
010001001011
011110110100
100001001011
101110110100
110011101100
110101110001
110110011010
111001010110
111010100011
111100001101
```

一方, テストケース生成問題の問題規模が大きくなると, 生成される SAT 問題のサイズが巨大になるという問題があり, サイズの縮小化が今後の大きな課題である.

上記以外にも, SAT 型制約ソルバー Sugar, Sugar++ の実装を行った. 特に, Sugar は, 2008 年及び 2009 年の国際 CSP ソルバー競技会の複数部門において, 優秀な成績をおさめている.

#### 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 7 件)

- ① 田村直之, 丹生智也, 番原睦則, 制約最適化問題と SAT 符号化, 人工知能学会誌, 査読有, 25 巻 1 号, 2010, pp. 77-85
- ② 番原睦則, 田村直之, SAT によるシステム検証, 人工知能学会誌, 査読有, 25 巻 1 号, 2010, pp. 122-129

- ③ N. Tamura, A. Taga, S. Kitagawa, and M. Banbara, Compiling Finite Linear CSP into SAT, Constraints, 査読有, Vol. 14 Issue. 2, 2009, 254-272

- ④ N. Tamura, T. Tanjo, and M. Banbara, System Description of a SAT-based CSP Solver Sugar, Proceedings of the Third International CSP Solver Competition, 査読有, 2008, pp. 71-75

- ⑤ T. Tanjo, N. Tamura, and M. Banbara, Sugar++: A SAT-based MAX-CSP/COP Solver, Proceedings of the Third International CSP Solver Competition, 査読有, 2008, pp. 77-82

- ⑥ N. Tamura and M. Banbara, Sugar: A CSP to SAT Translator Based on Order Encoding, Proceedings of the Second International CSP Solver Competition, 査読有, 2008, pp. 65-69

- ⑦ 番原睦則, 田村直之, 井上克己, Prolog から Java へのトランスレータ処理系とその応用, コンピュータソフトウェア, 査読有, 24 巻 3 号, 2007, pp. 75-86

[学会発表] (計 7 件)

- ① 丹生智也, 田村直之, 番原睦則, 制約充足問題の SAT 変換とグラフ彩色問題への応用, 日本ソフトウェア科学会第 26 回大会, 2009 年 9 月 16 日-18 日, 島根大学 (島根県)

- ② 丹生智也, 番原睦則, 田村直之, Prolog から Java へのトランスレータ処理系の設計と実装, 第 11 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 (PPL2009), 2009 年 3 月 10 日, 高山グリーンホテル

- ③ 番原睦則, 丹生智也, 田村直之, SAT 変換に基づく制約ソルバー Sugar, 第 11 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 (PPL2009), 2009 年 3 月 10 日, 高山グリーンホテル

- ④ 田村直之, 多賀明子, 番原睦則, 宋剛秀, 鍋島英知, 井上克己, ショップ・スケジューリング問題の SAT 変換による解法, スケジューリング・シンポジウム 2007, 2007 年 9 月 29 日-30 日, 京都大学

- ⑤ 多賀明子, 田村直之, 北川哲, 番原睦則, 田村直之, グリッド計算環境上でのショップ・スケジューリング問題の SAT 変換による

解法, スケジューリング・シンポジウム 2007,  
2007年9月29日-30日, 京都大学

⑥ 田島宏史, 多賀明子, 丹生智也, 田村直之, 番原睦則, Sugar: SAT変換による制約解消システムのデモ, 日本ソフトウェア科学会第24回大会, 2007年9月12日-14日, 奈良先端科学技術大学院大学

⑦ 丹生智也, 田村直之, 番原睦則, Prolog Cafe: PrologからJavaへのトランスレータ処理系のデモ, 日本ソフトウェア科学会第24回大会, 2007年9月12日-14日, 奈良先端科学技術大学院大学

[その他]

ホームページ等

<http://kaminari.istc.kobe-u.ac.jp/PrologCafe/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

番原 睦則 (BANBARA MUTSUNORI)

神戸大学・学術情報基盤センター・准教授

研究者番号: 80290774