

## 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 25 年 5 月 24 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22700032

 研究課題名（和文） 様々な論理推論エンジンを用いた組み合わせテストの  
テストケース自動生成

 研究課題名（英文） Automatic Test Case Generation for Combinatorial Testing  
Using Various Logical Inference Engines

研究代表者

 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

研究成果の概要（和文）：

組合せテストは、ソフトウェアの信頼性・安全性を高めるためのソフトウェア検証手法の1つである。本研究では、組合せテストのテストケース生成の性能向上を目指し、SAT ソルバー、制約ソルバー、解集合ソルバーを用いたテストケース自動生成ツールに関する研究開発を行った。提案手法を実装した3つのツールは、組合せデザイン・ハンドブック等に記載されているベンチマークに対して、様々な既存手法で得られた既知の最良値を更新することに成功した。

研究成果の概要（英文）：

We studied automatic test case generation of combinatorial testing by using several logical inference engines such as SAT solvers, constraint solvers, and ASP solvers. We carried out experiments on some benchmark sets in Handbook of Combinatorial Designs. Our proposed methods succeeded either in improving the bounds or producing the same bounds for many instances, compared with the previous best known bounds.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

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：組合せテスト, SAT, 制約プログラミング, 解集合プログラミング

## 1. 研究開始当初の背景

ソフトウェアテストは、ソフトウェアの信頼性・安全性を高めるためのソフトウェア検証手法の1つである。近年、ソフトウェアの大規模化・複雑化に伴い、必要となるテストケースが増える一方、そのテスト期間については短期化が求められている。

組合せテスト (combinatorial testing)

は、ソフトウェアテスト手法の1つである。この手法の特長は、欠陥の多くは少数のパラメータの組み合わせによって発生するという観測を元に、テストケースの増大を回避し、現実的に実行可能であり、かつ効果的なテストケースを生成できる点である。

組合せテスト手法としては、ペアワイズ法が広く知られている。ペアワイズ法は既に実用化の段階に入っており、商用を含め多くの

テストケース生成ツールが開発されている。しかし、最近、ペアワイズ法では欠陥を発見できない事例が数多く報告されている。

この問題を解決するために、ペアワイズ法を拡張する試みとして、カバリング配列 (Covering Array; CA) に基づく新しい組み合わせテストの研究が進んでいる。その注目度の高さは、米国立標準技術研究所の ACTS プロジェクトからも伺える。しかし、CA に基づく組合せテストの場合、そのテストケースを効率よく生成することは難しい。

本研究で提案する様々な論理推論エンジンを用いたテストケース自動生成方法は、上記の CA に基づく組合せテストを実現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、SAT ソルバー、制約ソルバー、解集合プログラミング (Answer Set Programming; ASP) を含む様々な論理推論エンジンを用いて、ソフトウェアの信頼性・安全性を高めるための現実的かつ効果的なテストケースを自動生成することである。

本研究はプロトタイプ・システムではなく、実用的で完成度の高いシステムの実現を目標とし、以下の3つのテストケース生成ツールに関する研究開発を行った。

(1) SAT ソルバーを用いたテストケース生成ツール

(2) 制約ソルバーを用いたテストケース生成ツール

(3) ASP ソルバーを用いたテストケース生成ツール

## 3. 研究の方法

上記の3つのツールについて、その研究方法を述べる。

(1) SAT ソルバーを用いたテストケース生成ツール

命題論理の充足可能性判定 (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をうけて、SAT 技術を多分野に応用する研究が急速に拡大している。SAT 符号化とは、元の問題を SAT 問題に変換し、SAT ソルバーを用いて求解する方法である。

CA 構成問題に対して、新しい SAT 符号化法を2つ提案した。1つは、研究代表者・番原らが提案している順序符号化法と呼ばれる符号化法をベースにしたものである。もう1つは、Hnich 符号化法と順序符号化法を融合したものである。

本研究では、順序符号化法と Hnich 符号

化法の2つの SAT 符号化の長所を取り入れることにより、テストケース生成の性能を大きく向上できることを示した。

(1) 制約ソルバーを用いたテストケース生成ツール

制約モデリングは与えられた問題を効率よく解く上で重要な役割を果たすことが知られている。

カバリング配列に類似したパッキング配列 (Packing Arrays; PA) を構成する問題に対して、4つの制約モデルを提案した。PA は別名で相互直交的な部分ラテン方陣系とも呼ばれる困難な組合せ問題である。なかでも、基本・相違モデルは、与えられた PA のパッキング制約について、その SAT 符号化後の節数を小さく抑えることができ、SAT 型制約ソルバーに適した制約モデルである。

本研究では、基本・相違モデルと SAT 型制約ソルバー Sugar を用いることにより、PA 構成問題の求解性能を大きく向上できることを示した。

(2) ASP ソルバーを用いたテストケース生成ツール

ASP は解の列挙、多目的最適化の機能を有する次世代 SAT 技術の1つである。ASP は一階述語論理に基づく高い表現力を持ち、記号処理問題をコンパクトかつ宣言的に記述することができる。その注目度の高さは、ごく最近の ACM の会誌に ASP が紹介されていることから伺える。

イベント順序テスト (Event-Sequence Testing) のテストケース生成問題は、順序カバリング配列 (Sequence Covering Array; SCA) 構成問題に帰着できることが知られている。

本研究では、SCA 構成問題に対して、新しい3つの制約モデルおよびその ASP 符号化を提案した。なかでも、結合行列モデルの ASP 符号化は、与えられた SCA のカバレッジ制約を基数制約を用いて簡潔に表現できることが特長である。

## 4. 研究成果

上記の3つのツールについて、その研究成果を述べる。

(1) SAT ソルバーを用いたテストケース生成ツール

提案した CA 構成問題に対する SAT 符号化および高速 SAT ソルバーを用いて、小中規模の CA ベンチマーク問題に対する実行

実験を行った。その結果、提案手法は様々な既存手法（群論等の数学的手法、貪欲法、局所探索法など）と比較して、ほぼ同等の性能を示すことができた。さらに、2009年に出版された Handbook of Satisfiability 中に記載されている未解決問題のうち、CAN(3, 12, 2)の最良値が最適値であることを証明することに成功した。加えて、CAN(2, 7, 4)の既知の下限を更新することにも成功した。

t	k	g	b	Result	GlueMiniSat 2.2.5	
					O.E.	M.E.
2	8	3	12	UNSAT	T.O	1,233,375
2	7	4	20	UNSAT	1,446,275	T.O
2	5	6	38	?	T.O	T.O
3	12	2	14	UNSAT	2,977	2,256
3	7	4	87	?	T.O	T.O

(2) 制約ソルバーを用いたテストケース生成ツール

提案した PA 構成問題に対する制約モデルおよび SAT 型制約ソルバー Sugar を用いて、組合せデザイン・ハンドブックにある PA ベンチマーク問題を用いて、提案手法の比較・評価を行った。その結果、最適値が未知であった2問について既知の上限が最適値であることを示し、5問について新しい下限を得ることに成功した。

これまでの結果 [13][38]	新しく得られた結果
$20 \leq PAN(7, 6)$	$23 \leq PAN(7, 6)$
$22 \leq PAN(10, 8)$	$25 \leq PAN(10, 8)$
$16 \leq PAN(11, 8)$	$22 \leq PAN(11, 8)$
$16 \leq PAN(12, 8) \leq 19$	$PAN(12, 8) = 19$
$16 \leq PAN(13, 8) \leq 17$	$PAN(13, 8) = 17$
$27 \leq PAN(11, 9)$	$29 \leq PAN(11, 9)$
$18 \leq PAN(14, 9)$	$20 \leq PAN(14, 9)$

(3) ASP ソルバーを用いたテストケース生成ツール

提案した SCA 構成問題に対する ASP 符号化および高速 ASP ソルバー clasp を用いて、小中規模の SCA ベンチマーク問題に対する実行実験を行った。その結果、提案手法は、貪欲法等の既知の手法で得られた上限を大きく更新することに成功した。

## 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5件)

① 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

30(1):211-230, 2013.

DOI: 10.11309/jssst.30.1\_211. 査読有

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

29(4):114-129, 2012

DOI: 10.11309/jssst.29.4\_114. 査読有

③松中春樹, 丹生智也, 番原睦則, 田村直之

SAT 符号化を用いた釣合い型不完備ブロック計画の構成. 人工知能学会論文誌

27(2):10-15, 2012

DOI:10.1527/tjsai.27.10. 査読有

④Takehide Soh, Katsumi Inoue, Naoyuki Tamura, Mutsunori Banbara and Hidetomo Nabeshima

A SAT-Based Method for Solving the Two-dimensional Strip Packing Problem.

Fundamenta Informaticae

102(3-4):467-487, IOS Press, 2010

DOI: 10.3233/FI-2010-314. 査読有

⑤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

27(4):183-196, 2010.

DOI:10.11309/jssst.27.4\_183. 査読有

[国際会議論文] (計6件)

① Takehide Soh, Naoyuki Tamura, and Mutsunori Banbara

Scarab: A Rapid

Prototyping Tool for SAT-based Constraint Programming Systems. In: Matti Järvisalo and Allen Van Gelder (eds.), Proceedings of the 16th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2013)

Lecture Notes in Computer Science, Vol. 7962, pp. 429-436,

Springer, 2013. 査読有

②Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, and Katsumi Inoue

Generating Event-Sequence Test Cases by Answer Set Programming with the Incidence Matrix. In: Agostino Dovier and Vítor Santos Costa (eds.)

Technical Communications of the 28th International Conference on Logic Programming (ICLP '12), LIPIcs, Vol.17, pp.86-97, Schloss Dagstuhl, 2012  
DOI: 10.4230/LIPIcs.ICLP.2012.86. 査読有

③ Tomoya Tanjo, Naoyuki Tamura, and Mutsunori Banbara  
Azucar: A SAT-Based CSP Solver Using Compact Order Encoding - (Tool Presentation). In: Alessandro Cimatti and Roberto Sebastiani (eds.), Proceedings of the 15th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2012)  
Lecture Notes in Computer Science Vol.7317, pp.456-462, Springer, 2012  
DOI:10.1007/978-3-642-31612-8\_37. 査読有

④ Tomoya Tanjo, Naoyuki Tamura, and Mutsunori Banbara  
A Compact and Efficient SAT-Encoding of Finite Domain CSP. In: Karem A. Sakallah and Laurent Simon (eds.), Proceedings of the 14th International Conference on Theory and Applications of Satisfiability Testing (SAT 2011)  
Lecture Notes in Computer Science Vol.6695, pp.375-376, Springer, 2011  
DOI: 10.1007/978-3-642-21581-0\_36. 査読有

⑤ Mutsunori Banbara, Haruki Matsunaka, Naoyuki Tamura, and Katsumi Inoue  
Generating Combinatorial Test Cases by Efficient SAT Encodings Suitable for CDCL SAT Solvers. In: Christian G. Fermüller and Andrei Voronkov (eds.), Proceedings of the 17th International Conference on Logic for Programming, Artificial Intelligence and Reasoning (LPAR-17), Lecture Notes in Computer Science Vol.6397, pp.112-126  
Springer, 2010  
DOI: 10.1007/978-3-642-16242-8\_9. 査読有

⑥ Naoyuki Tamura, Tomoya Tanjo and Mutsunori Banbara  
Solving Constraint Satisfaction Problems with SAT Technology  
In: Matthias Blume, Naoki Kobayashi, and Germán Vidal (eds.), Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Functional and Logic Programming (FLOPS 2010)  
Lecture Notes in Computer Science, Vol.6009, pp.19-23, Springer, 2010  
DOI: 10.1007/978-3-642-12251-4\_3. 査読有

[解説論文, ソフトウェア紹介等] (計4件)

①田村直之, 番原睦則  
直観主義線形論理型言語 LLP とそのコンパイル処理系. コンピュータソフトウェア 30(2): 83-89, 2013. 査読有

② 番原睦則, 宋剛秀, 田村直之, 井上克巳  
私のブックマーク: SAT ソルバー. 人工知能学会誌 28(2):343-348, 2013年3月. 査読無

③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 25(1):77-85, 2010年1月. 査読無

④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 25(1):122-129, 2010年1月. 査読無

[その他の論文] (計11件)

① 則武治樹, 番原睦則, 宋剛秀, 田村直之, 井上克巳. SAT 符号化を用いたパッキング配列の構成. 第15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 2013) 論文集カテゴリ C1, 2013. 査読無

② 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ブ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回大会講演論文集, 7A-2, 日本ソフトウェア科学会, 2012. (学生奨励賞受賞) 査読無

③ 則武治樹, 番原睦則, 田村直之, 井上克巳. 制約充足問題の SAT 符号化を用いたパッキング配列の構成. 2012年度人工知能学会全国大会(第26回)論文集, 1E3-0S-4-1, 人工知能学会, 2012. 査読無

④ 船越泰輔, 番原睦則, 田村直之. ハミルトン閉路問題の SAT 符号化に関する研究. 2012年度人工知能学会全国大会(第26回)論文集, 1E3-0S-4-2, 人工知能学会, 2012. 査読無

⑤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. 日本ソフトウェア科学会第28回大会講演論文集, 2A-4, 日本ソフトウェア科学会, 2011. 査読無

⑥田村直之, 丹生智也, 番原睦則. SAT 型制約ソルバー Sugar と Scala インターフェイス

について. 日本ソフトウェア科学会第 28 回大会講演論文集, 6E-3, 日本ソフトウェア科学会, 2011. 査読無

⑦丹生智也, 田村直之, 番原睦則. 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. 2011 年度人工知能学会全国大会(第 25 回)論文集, 3J1-OS7-1in, 人工知能学会, 2011. 査読無

⑧松中春樹, 丹生智也, 番原睦則, 田村直之. SAT 符号化を用いた釣合い型不完備ブロック計画の構成. 2011 年度人工知能学会全国大会(第 25 回)論文集, 3J1-OS7-2, 人工知能学会, 2011. 査読無

⑨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. 人工知能基本問題研究会(第 81 回), 人工知能学会研究会資料 SIG-FPAI-B004, pp. 15-17, 人工知能学会, 2011. 査読無

⑩丹生智也, 田村直之, 番原睦則. 整数有限領域上の線形制約充足問題のコンパクトかつ効率的な SAT 符号化の提案. 人工知能基本問題研究会(第 81 回), 人工知能学会研究会資料 SIG-FPAI-B004, pp. 19-24, 人工知能学会, 2011. 査読無

⑪番原睦則, 松中春樹, 田村直之, 井上克巳. SAT 技術を用いた組合せテストケース生成. 日本ソフトウェア科学会第 27 回大会講演論文集, 1B-3, 日本ソフトウェア科学会, 2010. 査読無

[学会発表] (計 4 件)

① 宋剛秀, 田村直之, 番原睦則. Scarab: 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高速開発ツール. 第 15 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 2013), 日本ソフトウェア科学会, 福島県会津若松 東山温泉御宿東鳳 (福島県会津若松市東山町), 2013 年 3 月 5 日.

② Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, Katsumi Inoue, and Hidetomo Nabeshima. Generating Event-Sequence Test Cases by Constraint Programming and Answer Set Programming. The 2012 CRIL-NII Collaborative Meeting on Reasoning about Dynamic Constraint Networks, Université d'Artois, Lens, France, November 23th, 2012.

③ 番原睦則. SAT 技術を用いた組合せテス

トケース生成. ERATO セミナー, JST ERATO 湊離散構造処理系プロジェクト, 関西サテライトラボ (大阪府大阪市北区芝田), 2012 年 7 月 6 日.

④丹生智也, 田村直之, 番原睦則. Azucar: コンパクト順序符号化を用いた SAT 型制約ソルバー. 第 14 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 2012), 日本ソフトウェア科学会, 和歌山県 南紀白浜 むさし (和歌山県西牟婁郡白浜町), 2012 年 3 月 8 日.

[その他]

①PBSugar: SAT 技術を用いた擬似ブル制約ソルバー  
<http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/pbsugar/>

②Scarab: A Rapid Prototyping Tool for SAT-based Constraint Programming Systems  
<http://kix.istc.kobe-u.ac.jp/~soh/scarab/>

③Copriss: Scala 上の制約プログラミングシステム  
<http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/copriss/>

④Sugar: SAT 技術を用いた制約ソルバー  
<http://bach.istc.kobe-u.ac.jp/sugar/>

⑤Azucar: A SAT-based Constraint Solver based on Compact Order Encoding  
<http://code.google.com/p/azucar-solver/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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