

令和 6 年 5 月 22 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11828

研究課題名（和文）SAT技術に基づく系統的探索と確率的探索の統合的技法の研究開発

研究課題名（英文）Research and Development on SAT-based Integration of Systematic and Stochastic Search

研究代表者

番原 睦則（BANBARA, Mutsunori）

名古屋大学・情報学研究科・教授

研究者番号：80290774

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、SAT 技術の発展形である解集合プログラミング（Answer Set Programming; ASP）を用いて、系統的探索と確率的局所探索を統合的に扱うハイブリッド手法の研究開発を進めた。巡回セールスマン問題や最小ヒント数独生成問題をはじめとする求解困難なベンチマーク問題を使って提案手法を評価し、ASP 技術の特長を活かした技法の利点・有効性・効率性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の主要成果の一つである優先度付き巨大近傍探索（Large Neighborhood Prioritized Search; LNPS）は、組合せ最適化問題に対するメタ戦略の一種である。この LNPS は、系統的探索の長所である最適性の保証と確率的局所探索の長所であるスケーラビリティの両方の長所を兼ね備えたハイブリッド手法である。この成果は、高度な知識表現・推論・最適化を必要とするソフトウェア開発において、既存技術では解くことが困難だった問題に対し、高性能かつ高機能な推論基盤を提供するものである。

研究成果の概要（英文）：We developed a hybrid approach between systematic search and stochastic local search for combinatorial optimization based on Answer Set Programming (ASP). To evaluate the effectiveness of our approach, we conducted experiments on a challenging benchmark, including the traveling salesperson problem and the sudoku puzzle generation of minimal hints.

研究分野：情報学基礎

キーワード：解集合プログラミング 組合せ最適化 巨大近傍探索 命題論理の充足可能性判定(SAT)

1. 研究開始当初の背景

(1) SAT 技術の発展

SAT (Boolean SATisfiability) は命題論理式の充足可能性を判定する問題である。SAT の研究は、1960 年代の Davis らによる DPLL アルゴリズムの提案、1971 年の Cook による NP 完全性の証明など、計算機科学および人工知能の中心的課題である。SAT を解くプログラムである SAT ソルバーは、これまで膨大な量の研究がなされ、ここ 20 年でその性能は飛躍的に向上した [引用文献(1)]。これを背景として、MaxSAT、SMT、解集合プログラミングなど SAT を拡張・発展させた問題を中心に SAT 技術が大きな広がりを見せ、ハードウェアやソフトウェアの検証を始め、大規模な問題を解くために必須の技術となっている。

(2) 解集合プログラミングの成功

解集合プログラミング (Answer Set Programming; ASP) は、論理プログラミングから派生した宣言的プログラミングパラダイムである。ASP 言語は、命題表現に限られる SAT を拡張し述語表現を許した宣言的知識表現言語である。ASP ソルバーは安定モデル意味論に基づく解集合を計算するプログラムである。近年、SAT ソルバーを応用した高速 ASP ソルバーが実現され、AI 分野の諸問題への実用的応用が急速に拡大している。

(3) 系統的探索と確率的局所探索の統合による新たな探索技法の探究

SAT 技術の発展に伴い、ASP 技術は大きく進歩し、組合せ最適化問題・極小問題・列挙問題等への拡張についても研究が進められてきた。しかし、これまでの拡張のほとんどは系統的探索をベースにしたものであり、スケーラビリティに限界があるのも事実である。本研究では、以上のような学術的背景の下で、“**系統的探索と確率的探索を車の両輪として扱う統合的アルゴリズムとはどのようなものなのか?**”を学術的な「問い」と位置づけ、既存の ASP 技術の限界突破に向けた研究課題に取り組んだ。

2. 研究の目的

本研究の目的は、Beyond NP に向けた SAT/ASP 技術発展の重要課題の一つである「最適化や極小問題等への対応」について、系統的探索と確率的局所探索の統合による新たな探索技法を探究し、高性能な基盤ソフトウェアを実現することである。

3. 研究の方法

本研究を遂行するために、国内 2 つの研究機関(名古屋大学と神戸大学)に所属する 3 名の研究者、および、1 名の海外共同研究者(ポツダム大学)の合計 4 名からなる研究チームを組織した。

本研究の具体的な研究テーマは以下の通りである。

- 系統的探索と確率的探索を統合的に扱うアルゴリズムの研究
- ASP に基づく系統的探索と確率的探索の統合
- 特長的なアプリケーションの開発

研究代表者と分担者の研究拠点が離れているため、3 名の研究者全員が参加する研究打合せを年に複数回開催した。ここでは、アイデア・実現技術の共有を主目的とし、進捗報告、研究意見交換、研究計画・方法に関する議論を行った。海外共同研究者は、研究代表者と年に数回研究打合せ(主にオンライン)を行い、研究内容に対する助言・海外研究の紹介等を通じて本研究の推進に寄与した。研究成果は、国内外の学会等で発表するとともに、開発したソルバーおよびアプリケーションを公開ソフトウェアとして整備し、社会に発信した。

4. 研究成果

研究期間全体を通して、マルチショット ASP 解法を用いた優先度付き巨大近傍探索 (Large Neighborhood Prioritized Search; LNPS) アルゴリズムの提案、ASP ソルバー clingo 上での LNPS アルゴリズムの実装、各種ベンチマークを用いた性能評価を行った。以下、研究テーマごとに詳細を述べる。

(1) 系統的探索と確率的探索を統合的に扱うアルゴリズムの研究

優先度付き巨大近傍探索 (Large Neighborhood Prioritized Search; LNPS) は、組合せ最適化問題を解くためのメタ戦略の一種である。本研究では、マルチショット ASP 解法を用いた LNPS アルゴリズムを提案した。LNPS は初期解から開始し、現在の解に対して破壊 (destroy) と優先度付き系統的探索を用いた再構築 (reconstruct) を交互に繰り返すことによってより良い解を探索する手法である。

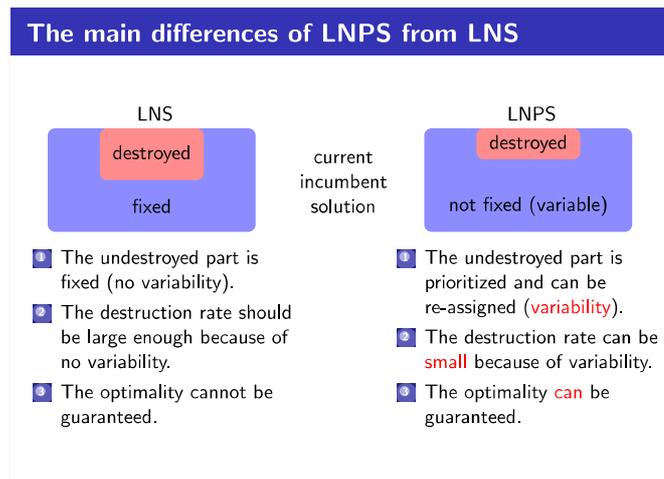


図 1

優先度付き系統的探索 (LNPS) と従来の巨大近傍探索 (LNS) との違いを図1に示す。LNPS の主な特長は、近傍の可変性 (variability) により破壊演算子に過度に依存しない柔軟な探索を実現できる点、解の最適性を保証できる点である。

(2) ASP に基づく系統的探索と確率的探索の統合

(1)の提案アルゴリズムを高速 ASP ソルバー clingo 上に実装した。開発した heulingo ソルバーは、組合せ最適化問題のインスタンス、それを解く ASP 符号化、LNPS ヒューリスティックスの設定を受け取り、LNPS アルゴリズムを用いて解を探索する。ASP を用いる利点としては、LNPS の優先度付き系統的探索を clingo の #heuristic 文を使って実装できる点、clingo のマルチショット ASP 解法を使って ASP の基礎化のコストを抑えつつ、探索中に獲得した学習節を再利用できる点が挙げられる。巡回セールスマン問題や最小数独生成問題などの各種ベンチマークを用いた総合的な性能評価を行った。その結果、heulingo ソルバーは、clingo や適応型 LNS を実装した最新のソルバー ALASPO と比較して、多くの問題に対してより良い性能を示し、提案手法の有効性を確認できた。

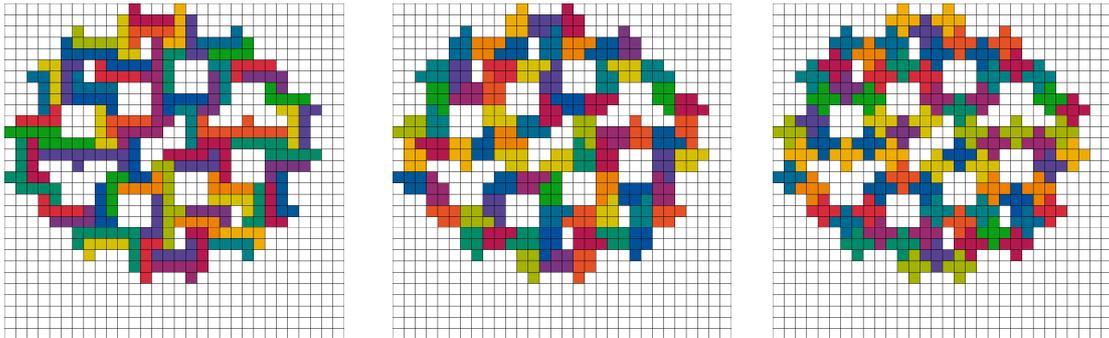
Experimental Result on Travelling Salesman Problem										
Instance	clingo	heulingo (LNS)			heulingo (LNPS)			ALASPO		
		avg.	min.	max.	avg.	min.	max.	avg.	min.	max.
dom_rand_70_300.1155482584.3	591	438.7	427	454	386.3	383	390	424.3	397	444
rand_70_300.1155482584.0	552	371.7	351	393	326.3	320	333	367.7	349	384
rand_70_300.1155482584.11	606	447.0	436	454	386.3	381	392	447.0	433	466
rand_70_300.1155482584.12	540	386.3	364	406	344.7	341	349	380.7	371	386
rand_70_300.1155482584.14	567	393.7	388	404	357.7	355	359	397.0	382	409
rand_70_300.1155482584.3	575	444.7	428	458	408.7	398	419	450.0	445	459
rand_70_300.1155482584.4	649	476.7	464	483	423.0	419	428	475.7	470	479
rand_70_300.1155482584.5	601	420.0	397	449	367.3	361	374	396.3	393	401
rand_70_300.1155482584.7	604	435.0	429	446	406.3	405	407	442.0	428	462
rand_70_300.1155482584.8	553	441.7	426	461	387.0	385	389	427.0	412	441
rand_70_300.1155482584.9	546	414.3	391	427	368.3	365	372	403.3	402	405
rand_80_340.1159656267.0	714	464.7	446	492	410.7	410	411	479.0	476	484
rand_80_340.1159656267.10	654	494.0	480	503	441.3	438	445	499.7	495	507
rand_80_340.1159656267.11	731	528.7	509	539	464.0	458	475	520.7	497	534
rand_80_340.1159656267.13	686	467.7	437	487	431.3	426	440	471.3	466	477
rand_80_340.1159656267.15	720	492.7	484	499	439.3	435	446	478.0	471	488
rand_80_340.1159656267.16	667	546.7	525	559	496.3	492	499	558.7	551	571
rand_80_340.1159656267.17	737	501.3	492	509	449.0	443	457	472.3	461	479
rand_80_340.1159656267.18	674	484.7	466	510	418.7	417	420	488.0	477	506
rand_80_340.1159656267.4	590	471.7	442	511	418.3	413	421	462.3	460	466
Average rate	1.000	0.728			0.649			0.721		

図 2

図 2 に巡回セールスマン問題の実験結果を示す。heulingo (LNPS) は、clingo, heulingo (LNS) や ALASPO と比較して、20 問すべてに対して、最も良い解を得ている。また、heulingo (LNPS) は、clingo と比較して、解の精度を平均で 35.1% 向上することに成功している。

(3) 特長的なアプリケーションの開発

最小公倍図形問題，配電網問題，ナーススケジューリング問題，コース時間割問題，車両装備仕様問題，独立集合問題，独立集合遷移問題，支配集合問題，支配集合遷移問題，ハミルトン閉路問題，ハミルトン閉路遷移問題などに関する応用研究を行った．最小公倍図形問題とは， n 個のポリオミノが与えられたとき，それぞれのポリオミノのみを使ってできる図形のうち，お互いに合同で面積最小な図形を求める問題である．この問題は計算量理論の観点から解くのが困難なことが証明されている．本研究では最小公倍図形問題を解く ASP 符号化を考案した．実験の結果，いくつかの問題に対して，既存の最良解を更新することに成功した．



上に新しく見つかった L5P5X5 の解を示す．左から，L ペントミノ，P ペントミノ，X ペントミノから構成されており，すべて合同である．既存の解が 400 個であったのに対し，この新しい解は 360 個の正方形で構成されている．ただし，この解が最適解であるかどうかは証明されていない．

まとめ

本研究では，SAT 技術の発展形である解集合プログラミング (Answer Set Programming; ASP) を用いて，系統的探索と確率的局所探索を統合的に扱うハイブリッド手法の研究開発を進めた．巡回セールスマン問題や最小ヒント数独生成問題をはじめとする求解困難なベンチマーク問題を使って提案手法を評価し，ASP 技術の特長を活かした技法の利点・有効性・効率性を明らかにした．また，特長的なアプリケーションとして，最小公倍図形問題，配電網問題，車両装備仕様問題など様々な応用研究を行い，問題記述例の蓄積を行った．

<引用文献>

- (1) Donald E. Knuth,
The Art of Computer Programming, Volume 4, Fascicle 6: Satisfiability,
Addison-Wesley Professional (2015)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山田 健太郎、湊 真一、田村 直之、番原 睦則	4. 巻 40
2. 論文標題 解集合プログラミングを用いた配電網問題の解法	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンピュータ ソフトウェア	6. 最初と最後の頁 2_3~2_18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11309/jssst.40.2_3	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 -
1. 著者名 Yamada Yuya, Banbara Mutsunori, Inoue Katsumi, Schaub Torsten, Uehara Ryuhei	4. 巻 LNCS 14549
2. 論文標題 Combinatorial Reconfiguration with Answer Set Programming: Algorithms, Encodings, and Empirical Analysis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th International Conference and Workshops on Algorithms and Computation (WALCOM 2024)	6. 最初と最後の頁 242 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-97-0566-5_18	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 該当する
1. 著者名 Banbara Mutsunori, Minato Shin-ichi, Ono Hirotaka, Uehara Ryuhei	4. 巻 LNCS 14519
2. 論文標題 On the Computational Complexity of Generalized Common Shape Puzzles	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the 49th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science (SOFSEM 2024)	6. 最初と最後の頁 55 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-52113-3_4	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 -
1. 著者名 Yamada Yuya, Banbara Mutsunori, Inoue Katsumi, Schaub Torsten	4. 巻 LNCS 14281
2. 論文標題 Recongo: Bounded Combinatorial Reconfiguration with Answer Set Programming	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th Edition of the European Conference on Logics in Artificial Intelligence (JELIA 2023)	6. 最初と最後の頁 278 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-43619-2_20	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 該当する

1. 著者名 Hirate Takahiro, Banbara Mutsunori, Inoue Katsumi, Lu Xiao-Nan, Nabeshima Hidetomo, Schaub Torsten, Soh Takehide, Tamura Naoyuki	4. 巻 LNCS 14281
2. 論文標題 Hamiltonian Cycle Reconfiguration with Answer Set Programming	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 18th Edition of the European Conference on Logics in Artificial Intelligence (JELIA 2023)	6. 最初と最後の頁 262 ~ 277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-43619-2_19	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 該当する

1. 著者名 Soh Takehide, Magnin Morgan, Le Berre Daniel, Banbara Mutsunori, Tamura Naoyuki	4. 巻 LNCS 14137
2. 論文標題 SAF: SAT-Based Attractor Finder in Asynchronous Automata Networks	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 21st International Conference on Computational Methods in Systems Biology (CMSB 2023)	6. 最初と最後の頁 175 ~ 183
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-42697-1_12	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 該当する

1. 著者名 小菅 脩司, 酒井 正彦, 番原 睦則	4. 巻 125
2. 論文標題 SQL 型制約プログラミングシステム CombSQL+ の複数制約ソルバー連携	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 人工知能学会研究会資料 人工知能基本問題研究会	6. 最初と最後の頁 54 ~ 59
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11517/jsaifpai.125.0_54	査読の有無 無
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 -

1. 著者名 Takehide Soh, Morgan Magnin, Daniel Le Berre, Mutsunori Banbara and Naoyuki Tamura	4. 巻 -
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 Proceedings of the 14th International Conference on Bioinformatics Models, Methods and Algorithms (BIOINFORMATICS 2023)	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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Raito Takeuchi, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, and Torsten Schaub	4. 巻 13880
2. 論文標題 Solving Vehicle Equipment Specification Problems with Answer Set Programming	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of the 25th International Symposium on Practical Aspects of Declarative Languages (PADL 2023)	6. 最初と最後の頁 232 ~ 249
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-031-24841-2_15	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 該当する

1. 著者名 番原 睦則、安田 宜仁、橋本 健二、堀山 貴史、湊 真一、中村 駆、西野 正彬、酒井 正彦、上原 隆平、宇野 裕之	4. 巻 119
2. 論文標題 レブ・タイルの定式化を用いた各種ソルバの性能比較	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 人工知能学会研究会資料 人工知能基本問題研究会	6. 最初と最後の頁 02 ~ 07
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11517/jsaifpai.119.0_02	査読の有無 無
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20件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 加藤聖人, 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支配集合遷移
3. 学会等名 第26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 2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 杉森唯瑠未, 宋剛秀, 田村直之, 井上克巳, 鍋島英知, 番原睦則
2. 発表標題 heulingo: 組合せ最適化のための解集合プログラミングに基づく優先度付き巨大近傍探索の実装
3. 学会等名 第26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 2024) ポスター発表
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 クッブル ドミニク, 番原睦則
2. 発表標題 Answer Set Programming を用いた圧縮指標の計算
3. 学会等名 2023年度冬のLAシンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 加藤聖人, 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支配集合遷移問題の解法に関する考察
3. 学会等名 2023年度人工知能学会全国大会(第37回)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高田和紀, 山田悠也, 番原睦則
2. 発表標題 解集合プログラミングを用いたトークンスライディング型・独立集合遷移問題の解法に関する考察
3. 学会等名 2023年度人工知能学会全国大会(第37回)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 平手貴大, 番原睦則, 井上克巳, 盧曉南, 鍋島英知, 宋剛秀, 田村直之
2. 発表標題 解集合プログラミングを用いたハミルトン閉路遷移問題の解法
3. 学会等名 第25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 2023)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shin-ichi Minato, Mutsunori Banbara, Takashi Horiyama, Jun Kawahara, Ichigaku Takigawa and Yutaro Yamaguchi
2. 発表標題 A ZDD-Based Method for Exactly Enumerating All Lower-Cost Solutions of Combinatorial Problems
3. 学会等名 Fifth Workshop on Enumeration Problems and Applications (WEPA-2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 加藤聖人, 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クイーン支配問題の解法に関する一考察
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田悠也, 番原睦則
2. 発表標題 解集合プログラミングに基づく組合せ遷移ソルバーとその性能評価
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第39回大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Mutsunori Banbara, Kenji Hashimoto, Takashi, Horiyama, Shin-ichi Minato, Kakeru Nakamura, Masaaki Nishino, Masahiko Sakai, Ryuhei Uehara, Yushi Uno, Norihito Yasuda
2. 発表標題 Solving Rep-tile by Computers
3. 学会等名 14th Gathering 4 Gardner Conference (2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takehide Soh, Hidetomo Nabeshima, Mutsunori Banbara, Naoyuki Tamura, and Katsumi Inoue
2. 発表標題 Towards CEGAR-based Parallel SAT Solving
3. 学会等名 Pragmatics of SAT (PoS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田悠也, 湊真一, 番原睦則
2. 発表標題 解集合プログラミングに基づく組合せ遷移ソルバーの実装方式に関する考察
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会第38回大会 46-L
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平手貴大, 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ハミルトン閉路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38回大会 34-L
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 1L-03
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 1L-04
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山田健太郎, 湊真一, 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配電網問題の解法
3. 学会等名 第24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 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 番原睦則, 橋本健二, 堀山貴史, 湊真一, 中村駆, 西野正彬, 酒井正彦, 上原隆平, 宇野裕之, 安田宜仁
2. 発表標題 レブ・タイルの定式化を用いた各種ソルバの性能比較
3. 学会等名 第16回組合せゲーム・パズル研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 湊真一, 番原睦則, 堀山貴史, 川原純, 瀧川一学, 山口勇太郎
2. 発表標題 ZDDの区間メモ化探索技法によるコスト制約組合せ問題の高速な解列挙
3. 学会等名 情報処理学会アルゴリズム研究会 第187回アルゴリズム研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 桑原和也, 田村直之, 番原睦則
2. 発表標題 解集合プログラミングに基づく系統的探索と確率的局所探索の統合的手法に関する一考察
3. 学会等名 2021年度人工知能学会全国大会(第35回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内頼人, 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多目的車両装備仕様問題の解法
3. 学会等名 2021年度人工知能学会全国大会(第35回)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Donald E. Knuth、和田 英一、岩崎 英哉、田村 直之、寺田 実	4. 発行年 2023年
2. 出版社 ドワンゴ	5. 総ページ数 728
3. 書名 The Art of Computer Programming Volume 4B Combinatorial Algorithms Part 2 日本語版	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究 分担者	田村 直之 (TAMURA Naoyuki) (60207248)	神戸大学・DX・情報統括本部・名誉教授 (14501)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	宋 剛秀 (SOH Takehide) (00625121)	神戸大学・DX・情報統括本部・准教授 (14501)	

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			
ドイツ	ポツダム大学			
フランス	CRIL-CNRS	アルトワ大学	Ecole Centrale de Nantes	