科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 1 3 日現在

機関番号: 12612 研究種目: 若手研究(B) 研究期間: 2017~2021

課題番号: 17K17725

研究課題名(和文)大規模制約充足問題の全解探索のための実用的な計算基盤の確立とその応用

研究課題名(英文) Development of Practical Techniques for All Soltuion Enumeration of Large-scale Constraint Satisfaction Problems

研究代表者

戸田 貴久 (Toda, Takahisa)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号:50451159

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文):本研究では、制約充足問題のすべての解を探索する手法を活用して、そのような解探索が求められる高度な問題解決のための効率的な計算基盤の開発を行った。主な成果として、ハードウェアやソフトウェアの不具合の原因解析を支援するための自動化手法を開発した。他の成果として、VLSIの単純配線問題や数独ヒント生成問題の効率的な解法を提案した。また新たな展開として、制約充足問題の解のサンプリング手法の開発とその応用、制約充足問題の最適化を応用したデータベースの匿名化に関する手法の開発など、当初想定していなかったプライバシー・セキュリティ関係の研究成果も得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義 情報システムは現代社会の基盤技術であり、特にセキュリティ、プライバシ、人命などが関わる場面では情報システムの高い品質が求められる。しかし、そのような品質の保証や解析に関わる技術は一般に計算コストが高く、本来的に完全な自動化は見込めないことが多い。本研究の主要な成果として、検証やテスト目的で広く使われている技術(モデル検査)に対してより高度な解析機能を追加した。これにより人手で行われる解析作業を一部自動化することが可能になる。モデル検査以外にもセキュリティ・プライバシーに関わる研究成果も得られ、制約充足に関する最新技術を活用した応用研究の新しい展開につながった。

研究成果の概要(英文): In this research, we developed an efficient method for computationally hard problems that intrinsically require us to enumerate all solutions of constraint satisfaction problems (CSPs). As a major achievement, we developed a computer-aided method to help us to locate faults in the designs of hardware and software. Model checking is a widely applied method for the verification and debugging of information systems. A counterexample is detected from an erroneous system as a proof of error by executing model checking, however, there is a big gap between computing counterexamples and locating faults. We thus proposed a method for providing information regarding error in a more understandable form than counterexamples by abstracting many counterexamples, which is expected to aid us in moving a trace of failure (i.e., a counterexample) to an understanding of the essence of the failure.

Beside the model checking application, we tackled security/privacy-related researches.

研究分野: 知能情報学

キーワード: 制約充足問題 SATソルバー モデル検査 反例解析 セキュリティ プライバシ

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等に ついては、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1.研究開始当初の背景

人工知能、データマイニング、計算生物学など幅広い分野で、集合、グラフ、論理式などの離散構造に関する計算問題を解くことが求められる。そのような問題の中には、制約を充足する解の網羅的な探索が本質的に必要とされるものが多くある。しかし、計算過程において莫大な数の組合世や場合分けが生じ、従来の手法では現実的な時間内に処理を完了させることが困難になる(図1)。一つの解を探索するSATソルバーは、近年の急速な発展により、大規模問題でもしばしば現実的な時間内に解くことができるようになった。一方、全ての解を探索する問題(AllSAT)はSATよりずっと困難である。近年、AllSATの重要性が様々な研究領域において認識され始めている。

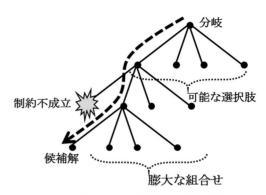


図1. 与えられた制約下での解の探索

2.研究の目的

現実の問題は数千~数万(あるいはもっと多くの)の変数を持つので、そのような大規模問題を扱うためには現在のソルバーの性能では十分ではない。また、各種の応用では効率の悪い方法が採用されているため、現実規模の問題に歯が立たないことが多く、AllSAT ソルバーを基盤にした問題解法が現実的な選択肢として認識されにくい。そこでこれらの課題の解決に向けて、本研究では、AllSAT ソルバー自体の高速化、および、AllSAT ソルバーを中心技術として活用した問題解決のための計算基盤の開発に取り組む。

3.研究の方法

(1) AIISAT ソルバーの高速化

変数の個数が増えればそれだけ問題を解くのが困難になる傾向がある。現実規模の問題は数千、数万(あるいはもっと多く)の変数を持つ。そのような問題に立ち向かうため、現実のデータの持つ構造や規則性に着目し、活用する。

(2) ALISAT ソルバーを中心技術として活用した問題解決のための計算基盤の開発

モデル検査の高機能化に取り組む。モデル検査(Model Checking)は、仕様に反する設計の不具合を発見するための強力な手法である。例えば、ネットワークの機能を検証するためには、不具合を引き起こす一種類のパケットではなく、サブネットやポート範囲などパケットの集合を知る必要がある。現実規模のネットワークの検証に向けて最新の AIISAT 技法を応用する。さらに、開発したモデル検査手法をネットワーク検証の研究で広く使われている実問題に適用し評価する。

(3) 応用研究の展開

その他にも制約充足分野の最新技術を活用した応用研究について調査・検討を進める。有望な 応用があれば研究を進める。

4. 研究成果

(1) ALISAT ソルバーの高速化

AIISAT ソルバーを活用した問題解法では、解決したい計算問題を命題論理式に変換する必要がある。この方式は、どんな問題であれいったん命題論理式に変換できさえすれば、同じ解法(AIISAT ソルバー)を利用できるという利点がある。しかし、変換後の命題論理式からは、変換前の問題がどのようであったかに関する情報は一般に失われてしまうので、問題ごとの特性を解法の中で活用することができない。しかも、変換により数多くの命題論理式が導入されるため、元の問題に比べて変換後の命題論理式のサイズが大きくなり、AIISAT ソルバーの性能が低下することがある。これらの課題を解決するために、命題論理式への変換過程で導入される論理変数の間において成り立つ機能的な従属関係を自動で抽出する方法を考案した。さらに、この従属関係をAIISAT ソルバーの探索アルゴリズムにおいて活用することで、AIISAT ソルバーの動作を高速化する手法を開発した。

(2) ALISAT ソルバーを中心技術として活用した問題解決のための計算基盤の開発

有界モデル検査はハードウェアやソフトウェアなどの情報システムに含まれる不具合を発見するための実践的な手法の1つとして広く知られている。ここで、有界モデル検査が不具合の証拠として出力するのは、システムの開発者が当然成り立つと期待する仕様に違反するシステムの実行例(反例)である。有界モデル検査では、そのような反例をSAT ソルバーで求める方法が取られてきた。しかし、誤りの根本原因が1つであったとしても、ただ1つの実行トレースが反

例として存在することはなく、一般には数多くの反例が存在する。有界モデル検査は1つの反例だけを不具合の証拠として提示するが、その反例を構成する変数の値自体には特段の意味はなく、異なる値をとっても不具合のままであることがある。本研究ではこの点に着目して、反例を構成する特定の変数をピックアップして、その変数の値だけを変動させるとき依然反例のままであるような、取りうる値の最長の区間を計算によって求める手法を開発した。

この一般的な手法をネットワーク検証に対して適用する方法についても与え、通常のモデル検査の限界についても議論し、提案手法の効果を計算機実験で評価した。具体的には以下の通りである。まず、ネットワーク検証における反例はネットワークの設計者が策定した仕様に違反するパケットに対応する。通常のモデル検査を適用する場合、そのようなパケットを1つ求めるだけであり、それだけではネットワークの設計中に含まれる不具合を特定するのに十分な情報とはならない。一方、本研究を適用する場合、例えば、送信先のアドレスなど特定のフィールドに着目して、その値だけが異なる一連の違反パケット群を求めることが可能になる。提案手法の性能を評価するために、計算機実験ではネットワーク検証の分野で広く使われているネットワークベンチマークを使い、通常のモデル検査を適用した場合に対して提案手法を適用した場合の性能を比較評価した。その結果、提案手法は通常のモデル検査よりも高度な計算処理をしているにも関わらず、通常のモデル検査に比べてそれほど大きな性能差は見られないことが確認された。

(3) 応用研究の展開

制約充足分野における最新の技術を適用することで、さまざまな問題解決への効率的な解法を提案した。主な成果としては、(a) VLSI における単純配線問題、(b) 数独ヒント生成問題、(c) 制約充足解のサンプリング技法の改善や応用、(d) 制約充足問題の最適化に基づくデータベースの匿名化、などが挙げられる。

ここでは、新たな展開として得られた研究成果(c)について以下に概要をまとめる。当初の研究計画では制約充足問題の解をすべて列挙する技術を中心にした研究を想定していた。しかし、実用上は必ずしもすべての解が必要とされることはあまりないので、そのような場合も考慮して、制約充足解をサンプリングする技法の研究も同時に進めた。この結果として、最新のサンプリング技法の精度を改善する手法を開発した。さらに、そのようなサンプリング技法を中心にした各種の問題解決についても研究を進めた。その結果として、複合イベント処理システムの開発を行った。すでに国内研究会において本システムの基本的な枠組みについて研究発表を行った。今後さらに内容を洗練させ、国際会議や国際的な学術誌において発表する予定である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件(うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件)

1 . 著名名 渡辺 光洋、戸田 貴久	【雑誌論文】 計4件(うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件)	
選及 洗洋、戸田 青久 J194-3 2. 論文程題 交差回避期約を用した単純配検決定問題のCSP解法 5、発行年 2021年 3. 補証を 電子情能通信学会論文誌 D 6、最初と最後の頁 434-441 3. 補証を 7 - プンアクセス 面際大者 7 - プンアクセス 1. 著名名 Kohel Nishi kawa, Takahisa Toda 4・巻 13 2. 論文標題 Exact Nethod for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues 5・発行年 2020年 3. 補証を Algorithms 6・風初と最後の頁 1-17 材理論文のDOI (デジタルオプジェクト護別子) 10.390/x13070171 面談の有無 有 オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 4・巻 2017年 3. 確証を Journal of Information Processing 6・最初と最後の頁 459-468 オープンアクセス 国際共著 - 2021年 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 0 原列と最後の頁 459-468 現職終を Journal of Information Processing 面際共著 - 2021年 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文種題 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文種題 1. 書名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文種題 1. 書名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母母	1,著者名	4 . 巻
2 . 論文権語 交 売回期制的を用いた単純配線決定問題のCSP解法		_
交差回場制約を用いた単純配接決定問題のSP解法 2021年 3. 補証を 電子情報連信学会論文誌 D 6. 最初と最後の頁 434-441 機能論文の001 (デジタルオプシェクト識別子) 10.14822/11ransinfj, 2020,0P7051 重勝共著 カープンアクセス 1. 著名名 Kohe Nishikawa, Takahisa Toda 13 2. 流文措題 Exact Method for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues 5. 飛行年 2020年 3. 補証を Algorithme 6. 最初と最後の頁 1-17 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 音 2. 第文措理 Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 5. 発行年 2017年 3. 維証名 Journal of Information Processing 6. 最初と最後の頁 458-488 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 5. 発行年 2017年 2. 流文措理 Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 5. 発行年 2017年 3. 維証名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 6. 最初と最後の頁 4. 巻 29 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 7. 受力アクセス 1. 業者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 5. 飛行年 2020年 2. 流文措理 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 5. 飛行年 2020年 3. 維証名 Journal of Information Processing 6. 最初と最後の頁 630-639 1 無疑名 Journal of Information Processing 6. 最初と最後の頁 630-639	极色 九件, 广山 县人	0104 0
交差回場制約を用いた単純配接決定問題のSP解法 2021年 3. 補証を 電子情報連信学会論文誌 D 6. 最初と最後の頁 434-441 機能論文の001 (デジタルオプシェクト識別子) 10.14822/11ransinfj, 2020,0P7051 重勝共著 カープンアクセス 1. 著名名 Kohe Nishikawa, Takahisa Toda 13 2. 流文措題 Exact Method for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues 5. 飛行年 2020年 3. 補証を Algorithme 6. 最初と最後の頁 1-17 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 音 2. 第文措理 Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 5. 発行年 2017年 3. 維証名 Journal of Information Processing 6. 最初と最後の頁 458-488 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 5. 発行年 2017年 2. 流文措理 Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 5. 発行年 2017年 3. 維証名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 6. 最初と最後の頁 4. 巻 29 1. 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 7. 受力アクセス 1. 業者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 5. 飛行年 2020年 2. 流文措理 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 5. 飛行年 2020年 3. 維証名 Journal of Information Processing 6. 最初と最後の頁 630-639 1 無疑名 Journal of Information Processing 6. 最初と最後の頁 630-639		
3 : 桶部名	2.論文標題	5.発行年
3 : 桶部名	交差回避制約を用いた単純配線決定問題のCSP解決	2021年
番菜館文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 担談館文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 担談館文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 担談館文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 1. 著名名	A TIME TO THE TOTAL PROPERTY OF THE PROPERTY O	2021
番菜館文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 担談館文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 担談館文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 担談館文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 1. 著名名		
指数論文のDDI(デジタルオブジェクト識別子) 音談の有無 有	3.雜誌名	6.最例と最後の貝
指数論文のDDI(デジタルオブジェクト識別子) 音談の有無 有	雷子情報通信学会論文誌 D	434-441
10.14923/transinfj_2020UP7051		
10.14923/transinfj_2020UP7051		
10.14923/transinfj_2020UP7051	A.A A.A	
1. 著者名	掲載論文のDOI(テシタルオフシェクト識別子)	
1. 著者名	10.14923/transinfi.2020JDP7051	有
1. 著者名 Kohei Nishikawa, Takahisa Toda 1.	,	
1. 著者名 Kohei Nishikawa, Takahisa Toda 1.	ナープンフクセフ	国際共 業
1 . 著名名 Kohei Nishikawa, Takahisa Toda 2 . 論文標題 Exact Nethod for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues 3 . 雑誌名 Algorithms 4 . 登 . 最初と最後の頁 1.17 超額論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/a13070171 第 . 本ーブンアクセス 1 . 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 4 . 登 . 最初と最後の頁 459-468 1 . 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 4 . 受 . 最初と最後の頁 4 . 受 . 表記の有無 有 エーブンアクセス オーブンアクセスではない、又はオーブンアクセスが困難 1 . 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 4 . 受 . 最初と最後の頁 5 . 発行年 2021年 1 . 著名名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 4 . 受 . 最初と最後の頁 630-639 月閲覧論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 1 . 要認の有無 有		国际共有
Kohei Nishikawa, Takahisa Toda 13 15 第行年 2020年 2	オーブンアクセスではない、又はオーブンアクセスが困難	-
Kohei Nishikawa, Takahisa Toda 13 15 第行年 2020年 2		
Kohei Nishikawa, Takahisa Toda 13 15 第行年 2020年 2	1 英老夕	A 类
2. 論文標題 Exact Method for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues 3. 雑誌名 Algorithms 6. 最初と最後の頁 1-17 1-		
Exact Wethod for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues 2020年 3. 雑誌名 Algorithms 6. 最初と最後の頁 1-17	Kohei Nishikawa, Takahisa Toda	13
Exact Wethod for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues 2020年 3. 雑誌名 Algorithms 6. 最初と最後の頁 1-17		
Exact Wethod for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues 2020年 3. 雑誌名 Algorithms 6. 最初と最後の頁 1-17	2 输文種類	5 発行任
3 . 雑誌名 Algorithms 6 . 最初と最後の頁 1-17		
Algorithms	Exact wethou for Generating Strategy-Solvable Sudoku Clues	2020年
Algorithms		
Algorithms	3.雑誌名	6. 最初と最後の百
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/a13070171		
10.3390/a13070171 有	Atgorithms	1-17
10.3390/a13070171 有		
10.3390/a13070171 有		
10.3390/a13070171 有	掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子)	査読の有無
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である) 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雜誌名 Journal of Information Processing 信職職論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雜誌名 Journal of Information Processing 4 . 巻 29 5 . 発行年 2021年 6 . 最初と最後の頁 4 . 巻 29 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 6 . 最初と最後の頁 630-639 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著		_
オープンアクセスとしている(また、その予定である) -	10.3390/a130/01/1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
オープンアクセスとしている(また、その予定である) -		
オープンアクセスとしている(また、その予定である) -	オープンアクセス	国際共著
1. 著者名		
Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題 Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 1. 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 4. 巻 29 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	7 JULY EXCOUNT (S.E. COTTLE COS)	
Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題 Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 1. 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 4. 巻 29 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著		
2. 論文標題 Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 1. 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 4 . 巻 2021年 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著 4 . 巻 29 5 . 発行年 2021年 6 . 最初と最後の頁 630-639	1.著者名	4.巻
2. 論文標題 Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 1. 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 4 . 巻 2021年 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著 4 . 巻 29 5 . 発行年 2021年 6 . 最初と最後の頁 630-639		25
Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 2017年 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsj jip.25.459 1. 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 4. 巻 29 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 4. 巻 2021年 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 6. 最初と最後の頁 630-639 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsj jip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	rakam sa roda, rakera mode	
Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 2017年 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsj jip.25.459 1. 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 4. 巻 29 2. 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 4. 巻 2021年 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 6. 最初と最後の頁 630-639 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsj jip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著		
3 . 雑誌名		
3 . 雑誌名	2.論文標題	5.発行年
3 . 雑誌名		
3 . 雑誌名		
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers	2017年
掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers	2017年
10.2197/ipsjjip.25.459 有 国際共著 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 - コ・著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 29 29 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 2021年 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 630-639 630-639 看 カープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名	2017年 6.最初と最後の頁
10.2197/ipsjjip.25.459 有 国際共著 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 - コ・著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 29 29 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 2021年 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 630-639 630-639 看 カープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名	2017年 6.最初と最後の頁
10.2197/ipsjjip.25.459 有 国際共著 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 - コ・著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 29 29 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 2021年 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 630-639 630-639 看 カープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名	2017年 6.最初と最後の頁
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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing	2017年 6 . 最初と最後の頁 459-468
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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing	2017年 6 . 最初と最後の頁 459-468
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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無
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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子)	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無
1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 4 . 巻 29 5 . 発行年 2021年 6 . 最初と最後の頁 630-639	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有
1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 4 . 巻 29 5 . 発行年 2021年 6 . 最初と最後の頁 630-639	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 オープンアクセス	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有
Takahisa Toda, Takeru Inoue 29 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 5 . 発行年 2021年 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 630-639 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 査読の有無 10.2197/ipsjjip.29.630 有	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 オープンアクセス	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有
Takahisa Toda, Takeru Inoue 29 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 5 . 発行年 2021年 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 630-639 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 査読の有無 10.2197/ipsjjip.29.630 有	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 オープンアクセス	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有
2.論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation5.発行年 2021年3.雑誌名 Journal of Information Processing6.最初と最後の頁 630-639掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630査読の有無 有オープンアクセス国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著
2.論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation5.発行年 2021年3.雑誌名 Journal of Information Processing6.最初と最後の頁 630-639掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630査読の有無 有オープンアクセス国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 -
Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 2021年 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 630-639 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 -
Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 2021年 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 630-639 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 -
3.雑誌名 Journal of Information Processing 6.最初と最後の頁 630-639 掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 査読の有無 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29
3.雑誌名 Journal of Information Processing 6.最初と最後の頁 630-639 掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 査読の有無 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2.論文標題	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年
Journal of Information Processing 630-639 掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 査読の有無 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2.論文標題	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年
Journal of Information Processing 630-639 掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 査読の有無 10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3. 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1. 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2. 論文標題	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年
掲載論文のDOI(デジタルオプジェクト識別子) 査読の有無 10.2197/ipsjjip.29.630 有	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年
10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2.論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3.雑誌名	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年 6.最初と最後の頁
10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2.論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3.雑誌名	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年 6.最初と最後の頁
10.2197/ipsjjip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2.論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3.雑誌名	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年 6.最初と最後の頁
10.2197/ipsj j ip.29.630 有 オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2.論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3.雑誌名	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年 6.最初と最後の頁
オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年 6.最初と最後の頁 630-639
オープンアクセス 国際共著	Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年 6.最初と最後の頁 630-639 査読の有無
	Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1.著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2.論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3.雑誌名 Journal of Information Processing	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年 6.最初と最後の頁 630-639 査読の有無
	 Exploiting Functional Dependencies of Variables in AII-Solutions SAT Solvers 3.雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 オープンアクセス	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 5.発行年 2021年 6.最初と最後の頁 630-639 査読の有無
オーノン火クセ人ではない、メはオーフン火クセスか困難	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI (デジタルオプジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 - 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 - 5.発行年 2021年 - 6.最初と最後の頁 630-639 - 査読の有無 有
	Exploiting Functional Dependencies of Variables in All-Solutions SAT Solvers 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.25.459 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 1 . 著者名 Takahisa Toda, Takeru Inoue 2 . 論文標題 Interval-based Counterexample Analysis for Error Explanation 3 . 雑誌名 Journal of Information Processing 掲載論文のDOI(デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.29.630 オープンアクセス	2017年 6.最初と最後の頁 459-468 - 査読の有無 有 国際共著 - 4.巻 29 - 5.発行年 2021年 - 6.最初と最後の頁 630-639 - 査読の有無 有

〔学会発表〕 計12件(うち招待講演 1件/うち国際学会 0件)
1.発表者名 戸田貴久
2 . 発表標題 制約言語の観点におけるCP4IMの複雑さ
3 . 学会等名 基盤(S) 離散構造処理系プロジェクト 「2019年度 初夏のワークショップ」
4 . 発表年 2019年
1.発表者名 戸田貴久
2 . 発表標題 SATフィルターの検討
3 . 学会等名 基盤(S) 離散構造処理系プロジェクト 「2019年度 秋のワークショップ」
4 . 発表年 2019年
1.発表者名 戸田貴久
2.発表標題 モデル検査における反例空間の構造解析
3.学会等名 人工知能学会 第107回人工知能基本問題研究会
4 . 発表年 2018年
1.発表者名 戸田貴久
2 . 発表標題 誤りの効果的な説明のための反例空間解析
3.学会等名 第170回アルゴリズム研究会
4 . 発表年 2018年

1.発表者名 戸田貴久
0 7V = 1¥0X
2 . 発表標題 モデル検査における反例発見から反例列挙への拡張
3.学会等名
基盤(S) 離散構造処理系プロジェクト「2017年度 初夏のワークショップ」
4 . 発表年 2017年
1 . 発表者名 戸田貴久
2 . 発表標題 命題論理式を充足する変数割当の網羅的探索手法について
3.学会等名
人工知能学会 第103回人工知能基本問題研究会(招待講演)
4 . 発表年 2017年
1.発表者名 戸田貴久,宋剛秀
2.発表標題 効率的なAIISATソルバーの実装と評価
3 . 学会等名
第19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
4 . 発表年 2017年
1.発表者名 渡辺光洋,戸田貴久
2.発表標題 交差回避制約によるSAT型ナンバーリンクソルバーの高速化
3 . 学会等名 人工知能学会 第109回人工知能基本問題研究会(SIG-FPAI)
4 . 発表年 2019年

1.発表者名 中島祐輝,戸田貴久
2 . 発表標題 命題論理式の解の一様サンプリングの改善
3 . 学会等名 第20回情報科学技術フォーラム
4.発表年 2021年
1.発表者名
F. 光极自石 戸田 貴久,伊藤 健洋,川原 純,宋 剛秀,鈴木 顕,照山 順一
2.発表標題
有界モデル検査による独立集合遷移問題の解法に関する考察
3 . 学会等名 第186回アルゴリズム研究発表会
4 . 発表年 2022年
1.発表者名 夏涛,戸田貴久
2 . 発表標題 不確実性下における複合イベント処理に関する考察
3 . 学会等名 第186回アルゴリズム研究発表会
4 . 発表年 2022年
1.発表者名 磯田 飛鳥, 戸田 貴久
2.発表標題 属性間依存度を考慮したデータベースの安全なフラグメント化
3 . 学会等名 第14回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム
4 . 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

(その	他]		
•		_	-	7

http://www.disc.lab.uec.ac.jp/toda/code/scg.html All Solutions SAT Repository		
http://www.sd.is.uec.ac.jp/toda/code/allsat.html		

6.研究組織

・切り元章		
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
井上 武	日本電信電話株式会社・NTT未来ねっと研究所・主任研究員	
研究 協 (Inoue Takeru) 者		

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
---------	---------