

令和 3 年 5 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2015～2019

課題番号：15H05706

研究課題名(和文)高階モデル検査の深化と発展

研究課題名(英文)Refinement and Extension of Higher-Order Model Checking

研究代表者

小林 直樹 (Kobayashi, Naoki)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号：00262155

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 149,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、代表者らがこれまで発展させてきた高階モデル検査の理論およびプログラム検証等への応用を進展させることを目的とした。理論面では、高階文法の反復補題についての40年以上ぶりの進展を得るとともに、異なる2種類の高階モデル検査であるHORSモデル検査とHFLモデル検査の間の関係を明らかにするなど、大きな進展が得られた。また応用面でも、高階モデル検査器およびプログラム自動検証器の大幅な高速化、検証できる性質の拡大、高階データ圧縮のための算術符号化などの成果が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

上述の成果は、代表者の専門であるプログラム検証などプログラミング言語分野・ソフトウェアの基礎理論のみならず、反復補題に関する40年以上ぶりの進展など、形式言語理論、計算量理論、データ圧縮など周辺の様々な学問分野に新たな知見をもたらすものであり、学術的意義が大きい。また、プログラムの自動検証技術を大きく進展させ、社会基盤を支えるコンピュータシステムの安全性向上に寄与するという社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：This research aimed to advance the theory of higher-order model checking and its applications. We have obtained good theoretical results, such as a pumping lemma for higher-order languages and the surprising connection between two kinds of higher-order model checking. We have also made progress in the applications of higher-order model checking, such as the big improvement in the efficiency of higher-order model checkers and program verification tools and in the class of program properties that can be verified, and a new technique for higher-order data compression using arithmetic coding.

研究分野：プログラミング言語、プログラム検証

キーワード：高階モデル検査 プログラム検証 データ圧縮 型システム 関数型プログラム 高階不動点論理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

交通や金融システムなどの様々な重要な社会基盤が計算機によって制御されている今日、計算機システム、とりわけソフトウェアの信頼性の担保が重要な課題である。本課題で扱う高階モデル検査は、システム検証手法として最も有望視されている手法の一つであるモデル検査の一般化であり、従来の有限状態モデル検査よりも強力で大きな可能性を秘めている。

研究開始当初の時点で、我々は、世界初の高階モデル検査器を実現するとともに、その上に関数型プログラムの全自動検証器を構築し、その有用性を示していた。また、データをそれを生成するプログラムの形に圧縮することにより、高階モデル検査の理論を用いて、圧縮したままの形で検索などの様々な操作を施せることも示していた。

2. 研究の目的

本課題では、上記背景で述べた成果をさらに飛躍的に発展させ、高階モデル検査の理論的基盤を確固たるものにするとともに、自動検証できるプログラムの規模、高階モデル検査に基づくデータ圧縮の性能などを飛躍的に増大させることを目指した。

3. 研究の方法

以下の4つの柱を設け、それらについて並行して研究を進めた。

(1) 高階モデル検査の理論の整備

高階モデル検査とは、高階再帰スキーム(HORS)と呼ばれる木文法によって生成される無限木の性質を判定する問題であるが、この木文法について重要な未解決問題が残っており、その解決に取り組んだ。また、高階モデル検査問題が一般には多重指数完全という計算量理論的には手に負えない問題のクラスに属しながらも、多くの入力に対して現実的な時間で解けることについて、理論的な保証を与えることを目指した。また、それらの理論的結果を基に、高階モデル検査アルゴリズムのさらなる高速化を目指した。

(2) 関数型プログラムの自動検証への応用

関数型プログラムの様々な検証問題を高階モデル検査問題に帰着することにより、関数型プログラムの全自動検証器を構築することができた。研究開始当初の時点ですでにそのような検証器 MoChI を構築済みだったが、これをさらに改良し、扱えるプログラムのサイズや機能、検証する性質を拡げることを目指した。

(3) 拡張高階モデル検査とオブジェクト指向・並行プログラムの検証への応用

高階モデル検査をさらに拡張した、拡張高階モデル検査のための効率のよい手法を考案し、それを基にオブジェクト指向プログラムや並行プログラムの全自動検証器を構築することを目指した。研究の遂行過程で、HORS モデル検査に基づいた拡張よりも高階不動点論理(HFL)に基づい

た別の高階モデル検査方式の方が有望であることがわかったため、後半はその方式に沿った研究を進めた。

(4) データ圧縮への応用

研究目的の項で述べたとおり、高階モデル検査の理論を用いることにより、プログラム形式で圧縮されたデータを、解凍することなく、様々な操作を施すことができる。この考え方に基づいたデータの圧縮・変換器のプロトタイプは作成済みだが、本課題ではこれをさらに改良し、実用的なレベルの圧縮・変換器を作成するとともに、その知識発見などへの応用を目指した。

4. 研究成果

「研究の方法」の項で述べた4つの柱ごとに研究成果を記述する。(括弧内の論文番号は、「論文x」は本報告書項目5の論文番号を、「論文一覧x」は様式2研究成果一覧中の論文番号を表す)

(1)高階モデル検査の理論的基盤の強化と高階モデル検査アルゴリズムの改良

(1-1)理論的基盤の強化。

高階モデル検査が現実の多くの問題に対して効率よく解けることの根拠を与えるための計算量の量的評価(どれくらいの割合の問題について効率よく解けるか)の問題に取り組んだ。まず前準備として関連する問題である、単純型付きラムダ計算の項の簡約列の長さに関する量的評価を行い、「ほとんどすべての単純型付きラムダ項が $(k-1)$ 重指数の長さの簡約列を持つ」ことを示した。この結果をまとめた論文はトップレベルの国際会議 FoSSaCS 2017 に採択されるとともに特に優れた採択論文をまとめたジャーナル特集号に招待・掲載された[論文9]。さらにこの結果を応用し、高階モデル検査問題についてもある種の仮定のもとで、ほとんどすべての問題が k 重指数完全であることを示した[論文6]。これらの結果は(多くの問題が効率よく解けることを示すという)当初の予想に反する結果であるが、逆に高階モデル検査の入力がどのような条件を満たせば効率よく解けるのかの判断の指針が得られるとともに、 k 重指数完全という非常に難しい問題について平均時計算量と最悪時計算量を組み合わせた、学問的にも興味深い結果が得られた。

また、高階文法に関する未解決問題として、反復補題の問題に取り組んだ[論文13,21]。高階言語の反復補題は極めて難しいとされており、オーダー反復補題はオーダー2の言語(indexed language)に対する1973年の林の結果以降、進展がなかった。我々は、ある予想(KruskalのTree Theoremの高階版)が成立するという仮定のもとに任意のオーダーについて反復補題が成立することを示すとともに、オーダー4までについては仮定なしに反復補題が成立することを示した。これは林の結果以来、40年以上ぶりに得られた特筆すべき進展である。

その他、当初まったく予定していなかった大きな理論的成果として、モデル検査の別の高階拡張であるHFLモデル検査と本課題で対象にしていたHORSモデル検査との間に密接な関係を明らかにしたことがあげられる[論文22]。これについては(3)の項でより詳しく述べる。

(1-2)高階モデル検査アルゴリズムの改良。

本課題開始前に作成済みだった高階モデル検査器 HorSat のアルゴリズムおよび実装を見直し、

種々のアルゴリズム上および実装上の最適化を組み込んだ新しい高階モデル検査器 HorSat2 を構築した。この結果、大幅な速度の改善を達成し、入力によっては数十万行の高階モデル検査問題を数分で解くことができるようになった(従来最速とされていた HorSat, HorSatZDD やオックスフォード大開発の Preface で千から一万行程度が限界だった)。これは、高階モデル検査問題が k 重指数時間完全である(固定パラメタ多項式時間ではあるが、係数がパラメタに関して k 重指数である)ことを考えると予想外の成果であり、当初期待していた以上の大きな進展である。HorSat2 はソースコードを公開しており、[論文 11,19,20,23]などの実験でも使用している。また、上記 HorSat2 は性質を safety property に特化しているが、活性を含む任意の \neg -regular property を扱うための高階モデル検査器の改良も行った[論文 17]。

(2)高階モデル検査のプログラム検証への応用

研究目的の項で述べた通り、主な課題は(2-1)検証できるプログラム規模の拡大および、(2-2)検証できる性質の拡充であった。以下、それぞれについて成果を記載する。

(2-1)検証できるプログラム規模の拡大。

高階モデル検査に基づく関数型プログラムの全自動検証器 MoCHi の改良およびそのための理論の構築を行った。1-2 の高階モデル検査器自体の高速化に加え、改良の骨子は、(a)大規模プログラムをまとめて検証するのは非現実的なので、プログラムを部品ごとに検証する分割検証を可能にしたこと[論文 20]、(b)主要なボトルネックであった、高階モデル検査への帰着の際に必要な抽象化のための述語発見手法の改良[論文 1,11]である。後者では、機械学習の一種である決定木学習の手法も取り入れ、制約付きホーン節(CHC)と呼ばれる述語制約問題を解くソルバを開発してそれを MoCHi と組み合わせることでボトルネックの緩和につながった。

これらの結果をふまえ、7 千行程度からなる上記 HorSat2 のコード自身の検証実験を行い、単純な性質については全自動で検証できることを確認した。

(2-2)検証できる性質の拡充。

研究期間前半では、(a)一般の線形時相論理で表される性質の検証[論文 27,28]、(b)等価性等のプログラムや関数間の関係の検証[論文 19]、(c)コード生成プログラムの検証[論文 18]、(d)(fork/join/lock をプリミティブとして持つ)並行プログラムの検証[論文 23]について研究を行い、新しい手法を考案するとともに実装を通してその有効性を示した。

後半では(3)で述べる HFL モデル検査を用いた方式に軸足を移し、特に(a)の時相的性質についてより広範囲の性質の統一的検証を可能にした[論文 12]。

(3)拡張高階モデル検査とそのプログラム検証への応用

高階モデル検査(HORS モデル検査)の拡張として、検証対象の HORS に再帰型を加えて拡張した μ HORS のための新しいモデル検査アルゴリズムを考案、それに基づいた μ HORS モデル検査器 muhorsar を実装するとともに、Java のサブセットから μ HORS への変換器も拡張した。これにより、従来の μ HORS モデル検査器 RTRecS ではタイムアウトしていた多くの問題が解けるようになり、200 行弱の Java プログラムの検証にも成功した[論文 24,33]。

また、HORS モデル検査とは異なる別の高階モデル検査の概念である HFL モデル検査およびそれを用いたプログラム検証についても研究を行った。HORS モデル検査は、通常モデル検査

の検証対象の記述言語を高階に拡張したものである一方、HFL は検証する性質の記述言語を高階にしたものであるが、実は HORS モデル検査問題と HFL モデル検査問題との間に相互変換が存在する、という当初予期していなかった結果を得た[論文 22]。さらに、その相互変換をヒントに、プログラム検証問題を、拡張 HFL モデル検査問題(HFL に整数を加えて拡張して得られる HFLZ に関するモデル検査問題)に帰着する手法を考案した。これによって、上記の項目(2-2)で行っていた様々な性質の検証が拡張 HFL モデル検査を通して統一的に扱えるようになった。これは当初予定していなかった想定外の成果である。本研究期間の終盤ではオーダー1 の HFL についてこの結果を応用し、C 言語のプログラムの CTL 性質の検証に関する標準的なベンチマークについて、CTL に特化して設計された従来の手法に比べて、大幅な検証効率の改善を達成するなど、極めて有望な結果が得られた。また、HFL の特殊ケースである制約付きホーン節(CHC)への帰着を通して、破壊的代入やオブジェクトを持つプログラムの自動検証手法を考案・実装して有効性を示した[論文 4,5,8]

(4)高階モデル検査のデータ圧縮への応用

研究目的に記載のとおり、(4-1)高階圧縮の改良、および(4-2)高階圧縮の知識発見への応用、について研究を行った。それぞれについての経過は以下のとおり。

(4-1)高階圧縮の改良

高階圧縮を構成する(a)木構造データからそれを生成するラムダ項への変換、(b)ラムダ項からそれを表すビット列へのコーディング、のそれぞれの改良を行った。(a)については、これまではデータのサイズに対してほぼ線形時間で動作するという制約の下でアルゴリズムを設計していたが、それでは高階圧縮の能力を十分に引き出せないため、制約を線形「空間」に弱めた上でアルゴリズムを設計し直し、実装を行った。また、並行して、高階圧縮において重要な繰り返しパターンの発見のためのパターン照合アルゴリズムの高速化など、要素技術についての研究を行った[論文一覧 3-6,11,16,20,28-32]。(b)については、型付きラムダ計算の項の構文を文脈自由文法で近似し、その文法に Cameron の文脈自由言語用の算術符号化手法を用いることによって、従来の提案手法よりも大幅な改善(例えば Vytiniotis と Kennedy によって 2010 年に提案された手法と bzip2 の組み合わせよりもコードサイズで平均的に 25%程度の削減、かつ大幅な高速化)を達成した[論文 26]。

(4-2)高階圧縮を通じた知識発見

データを究極まで圧縮することによって知識発見が行えるかどうかを確認するため、研究計画で想定していた対象の自然言語文章とゲノムデータのうち、(文法など)性質のわかっている自然言語を当面の対象とし、圧縮を通して文法が取り出せるかどうかの検討を行った。検討の結果、上記(4-1)の(a),(b)のフェーズのうち、少なくとも(b)のビット符号化の効果も含めて考慮しなければ圧縮を通じた文法の発見は望めないとの結論に達した。その後、種々の実験・検討の結果、これまで取り組んだ決定的な文法による圧縮ではなく、確率的文法による圧縮が望ましいとの結論に達した[論文 3]。そこで、確率文脈自由文法の学習に用いられる Inside-Outside アルゴリズムを高階文法用に拡張することによって有望な結果を得ており、現在論文にまとめている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計51件（うち査読付論文 50件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 11件）

1. 著者名 Adrien Champion, Tomoya Chiba, Naoki Kobayashi, and Ryosuke Sato	4. 巻 64
2. 論文標題 ICE-Based Refinement Type Discovery for Higher-Order Functional Programs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J. Autom. Reason.	6. 最初と最後の頁 1393-1418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Satake Yuki, Unno Hiroshi, Yanagi Hinata	4. 巻 34
2. 論文標題 Probabilistic Inference for Predicate Constraint Satisfaction	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 1644 ~ 1651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1609/aaai.v34i02.5526	査読の有無 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)	国際共著 -
1. 著者名 Naganuma Hiroaki, Hendrian Diptarama, Yoshinaka Ryo, Shinohara Ayumi, Kobayashi Naoki	4. 巻 -
2. 論文標題 Grammar Compression with Probabilistic Context-Free Grammar	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of DCC 2020	6. 最初と最後の頁 386-386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/DCC47342.2020.00093	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 Matsushita Yusuke, Tsukada Takeshi, Kobayashi Naoki	4. 巻 12075
2. 論文標題 RustHorn: CHC-Based Verification for Rust Programs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ESOP 2020, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 484 ~ 514
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-44914-8_18	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 Toman John, Siqu Ren, Suenaga Kohei, Igarashi Atsushi, Kobayashi Naoki	4. 巻 12075
2. 論文標題 ConSORT: Context- and Flow-Sensitive Ownership Refinement Types for Imperative Programs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ESOP 2020, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 684 ~ 714
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-44914-8_25	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshiki Nakamura, Kazuyuki Asada, Naoki Kobayashi, Ryoma Sin'ya, Takeshi Tsukada	4. 巻 167
2. 論文標題 On Average-Case Hardness of Higher-Order Model Checking	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of FSCD 2020, LIPIcs	6. 最初と最後の頁 21:1-21:23
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Naoki, Fedyukovich Grigory, Gupta Aarti	4. 巻 12079
2. 論文標題 Fold/Unfold Transformations for Fixpoint Logic	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of TACAS 2020, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 195 ~ 214
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-45237-7_12	査読の有無 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)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kobayashi Naoki, Nishikawa Takeshi, Igarashi Atsushi, Unno Hiroshi	4. 巻 11822
2. 論文標題 Temporal Verification of Programs via First-Order Fixpoint Logic	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of SAS 2019, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 413 ~ 436
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-32304-2_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 -

1. 著者名 Kobayashi Naoki, Dal Lago Ugo, Grellois Charles	4. 巻 -
2. 論文標題 On the Termination Problem for Probabilistic Higher-Order Recursive Programs	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of LICS 2019	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LICS.2019.8785679	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 Kazuyuki Asada, Naoki Kobayashi, Ryoma Sin'ya, Takeshi Tsukada	4. 巻 15
2. 論文標題 Almost Every Simply Typed Lambda-Term Has a Long Beta-Reduction Sequence	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Logical Methods in Computer Science	6. 最初と最後の頁 16:1-16:57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23638/LMCS-15(1:16)2019	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Watanabe Keiichi, Tsukada Takeshi, Oshikawa Hiroki, Kobayashi Naoki	4. 巻 -
2. 論文標題 Reduction from branching-time property verification of higher-order programs to HFL validity checking	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of PEPM 2019	6. 最初と最後の頁 22-34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3294032.3294077	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Sato Ryosuke, Iwayama Naoki, Kobayashi Naoki	4. 巻 -
2. 論文標題 Combining higher-order model checking with refinement type inference	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of PEPM 2019	6. 最初と最後の頁 47-53
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3294032.3294081	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Champion Adrien, Kobayashi Naoki, Sato Ryosuke	4. 巻 11275
2. 論文標題 Holce: An ICE-Based Non-linear Horn Clause Solver	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of APLAS 2018, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 146 ~ 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-02768-1_8	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 Eguchi Shingo, Kobayashi Naoki, Tsukada Takeshi	4. 巻 11275
2. 論文標題 Automated Synthesis of Functional Programs with Auxiliary Functions	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of APLAS 2018, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 223 ~ 241
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-02768-1_13	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 Kazuyuki Asada and Naoki Kobayashi	4. 巻 122
2. 論文標題 Lambda-Definable Order-3 Tree Functions are Well-Quasi-Ordered	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of FSTTCS 2018, LIPIcs	6. 最初と最後の頁 14:1-14:15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.FSTTCS.2018.14	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Champion Adrien, Chiba Tomoya, Kobayashi Naoki, Sato Ryosuke	4. 巻 10805
2. 論文標題 ICE-Based Refinement Type Discovery for Higher-Order Functional Programs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of TACAS 2018, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 365 ~ 384
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-89960-2_20	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Kensuke Kojima, Akifumi Imanishi, Atsushi Igarashi	4. 巻 60(3)
2. 論文標題 Automated Verification of Functional Correctness of Race-Free GPU Programs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Autom. Reasoning	6. 最初と最後の頁 279-298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10817-017-9428-2	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 Nozaki Yuki, Hendrian Diptarama, Yoshinaka Ryo, Shinohara Ayumi	4. 巻 10977
2. 論文標題 Enumeration of Cryptarithms Using Deterministic Finite Automata	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 23rd International Conference on Implementation and Applications of Automata, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 286 ~ 298
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-94812-6_24	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 Narisada Shintaro, Hendrian Diptarama, Yoshinaka Ryo, Shinohara Ayumi	4. 巻 11147
2. 論文標題 Linear-Time Online Algorithm Inferring the Shortest Path from a Walk	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 25th International Symposium on String Processing and Information Retrieval, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 311 ~ 324
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-00479-8_25	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 Kobayashi Naoki, Tsukada Takeshi, Watanabe Keiichi	4. 巻 10801
2. 論文標題 Higher-Order Program Verification via HFL Model Checking	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of ESOP 2018, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 711 ~ 738
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-89884-1_25	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Imanishi Akifumi、Suenaga Kohei、Igarashi Atsushi	4. 巻 -
2. 論文標題 A guess-and-assume approach to loop fusion for program verification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of PEPM 2018	6. 最初と最後の頁 2-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3162070	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 Satake Yuki、Unno Hiroshi	4. 巻 10981
2. 論文標題 Propositional Dynamic Logic for Higher-Order Functional Programs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of CAV 2018, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 105 ~ 123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-96145-3_6	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 Nanjo Yoji、Unno Hiroshi、Koskinen Eric、Terauchi Tachio	4. 巻 -
2. 論文標題 A Fixpoint Logic and Dependent Effects for Temporal Property Verification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of LICS 2018	6. 最初と最後の頁 759-768
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3209108.3209204	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 Igarashi Yuki、Diptarama、Yoshinaka Ryo、Shinohara Ayumi	4. 巻 10706
2. 論文標題 New Variants of Pattern Matching with Constants and Variables	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of SOFSEM 2018, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 611 ~ 623
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-73117-9_43	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 Jargalsaikhan Davaajav, Diptarama, Ueki Yohei, Yoshinaka Ryo, Shinohara Ayumi	4. 巻 10706
2. 論文標題 Duel and Sweep Algorithm for Order-Preserving Pattern Matching	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of SOFSEM 2018, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 624 ~ 635
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-73117-9_44	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 Unno Hiroshi, Satake Yuki, Terauchi Tachio	4. 巻 2
2. 論文標題 Relatively complete refinement type system for verification of higher-order non-deterministic programs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the ACM on Programming Languages	6. 最初と最後の頁 1 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3158100	査読の有無 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)	国際共著 -

1. 著者名 Unno Hiroshi, Torii Sho, Sakamoto Hiroki	4. 巻 10427
2. 論文標題 Automating Induction for Solving Horn Clauses	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of CAV 2017, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 571 ~ 591
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-63390-9_30	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 Asada Kazuyuki, Sato Ryosuke, Kobayashi Naoki	4. 巻 137
2. 論文標題 Verifying relational properties of functional programs by first-order refinement	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Science of Computer Programming	6. 最初と最後の頁 2 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scico.2016.02.007	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 Sin'ya Ryoma, Asada Kazuyuki, Kobayashi Naoki, Tsukada Takeshi	4. 巻 10203
2. 論文標題 Almost Every Simply Typed Lambda-Term Has a Long beta-Reduction Sequence	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of FoSSaCS 2017, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 53 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-662-54458-7_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 Sato Ryosuke, Kobayashi Naoki	4. 巻 10201
2. 論文標題 Modular Verification of Higher-Order Functional Programs	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of ESOP 2017, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 831 ~ 854
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-662-54434-1_31	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 Kazuyuki Asada and Naoki Kobayashi	4. 巻 80
2. 論文標題 Pumping Lemma for Higher-Order Languages	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of ICALP 2017, LIPIcs	6. 最初と最後の頁 97:1-97:14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ICALP.2017.97	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 Ryota Suzuki, Koichi Fujima, Naoki Kobayashi, and Takeshi Tsukada	4. 巻 84
2. 論文標題 Streett Automata Model Checking of Higher-Order Recursion Schemes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of FSCD 2017, LIPIcs	6. 最初と最後の頁 32:1-32:18
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.FSCD.2017.32	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 Watanabe Keiichi, Sato Ryosuke, Tsukada Takeshi, Kobayashi Naoki	4. 巻 -
2. 論文標題 Automatically disproving fair termination of higher-order functional programs	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of ICFP 2016	6. 最初と最後の頁 243-255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/2951913.2951919	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 Takeda Kotaro, Kobayashi Naoki, Yaguchi Kazuya, Shinohara Ayumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Compact bit encoding schemes for simply-typed lambda-terms	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of ICFP 2016	6. 最初と最後の頁 146-157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/2951913.2951918	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 Kobayashi Naoki, Laneve Cosimo	4. 巻 252
2. 論文標題 Deadlock analysis of unbounded process networks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Information and Computation	6. 最初と最後の頁 48 ~ 70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ic.2016.03.004	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 Kobayashi Naoki, Lozes Etienne, Bruse Florian	4. 巻 -
2. 論文標題 On the relationship between higher-order recursion schemes and higher-order fixpoint logic	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of POPL 2017	6. 最初と最後の頁 246-259
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3009837.3009854	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 Suwa Takashi, Tsukada Takeshi, Kobayashi Naoki, Igarashi Atsushi	4. 巻 -
2. 論文標題 Verification of code generators via higher-order model checking	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of PEPM 2017	6. 最初と最後の頁 59-70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3018882.3018886	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 Terao Taku, Tsukada Takeshi, Kobayashi Naoki	4. 巻 10017
2. 論文標題 Higher-Order Model Checking in Direct Style	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of APLAS 2016, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 295 ~ 313
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-47958-3_16	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 Yasukata Kazuhide, Tsukada Takeshi, Kobayashi Naoki	4. 巻 10017
2. 論文標題 Verification of Higher-Order Concurrent Programs with Dynamic Resource Creation	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of APLAS 2016, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 335 ~ 353
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-47958-3_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 -

1. 著者名 Li Xin, Kobayashi Naoki	4. 巻 9938
2. 論文標題 Equivalence-Based Abstraction Refinement for muHORS Model Checking	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of ATVA 2016, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 304 ~ 320
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-46520-3_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 -

1. 著者名 Kazuyuki Asada, Naoki Kobayashi	4. 巻 -
2. 論文標題 On Word and Frontier Languages of Unsafe Higher-Order Grammars	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of ICALP 2016	6. 最初と最後の頁 111:1-111:13
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ICALP.2016.111	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 Narisada Shintaro, Diptarama, Narisawa Kazuyuki, Inenaga Shunsuke, Shinohara Ayumi	4. 巻 10139
2. 論文標題 Computing Longest Single-arm-gapped Palindromes in a String	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of SOFSEM 2017, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 375 ~ 386
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-51963-0_29	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 Diptarama, Yoshinaka Ryo, Shinohara Ayumi	4. 巻 9954
2. 論文標題 AC-Automaton Update Algorithm for Semi-dynamic Dictionary Matching	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIRE 2016, Springer LNCS	6. 最初と最後の頁 110 ~ 121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-46049-9_11	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 Ryosuke Sato, Kazuyuki Asada, Naoki Kobayashi	4. 巻 23
2. 論文標題 Refinement Type Checking via Assertion Checking	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 827-834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjip.23.827	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 Yuma Matsumoto, Naoki Kobayashi, Hiroshi Unno	4. 巻 9458
2. 論文標題 Automata-Based Abstraction for Automated Verification of Higher-Order Tree-Processing Programs	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Proceedings of APLAS 2015, LNCS	6. 最初と最後の頁 295-312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-26529-2_16	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 Sadaaki Kawata, Kazuyuki Asada, Naoki Kobayashi	4. 巻 9458
2. 論文標題 Decision Algorithms for Checking Definability of Order-2 Finitary PCF	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Proceedings of APLAS 2015, LNCS	6. 最初と最後の頁 313-331
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-26529-2_17	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 Akihiro Murase, Tachio Terauchi, Naoki Kobayashi, Ryosuke Sato, Hiroshi Unno	4. 巻 なし
2. 論文標題 Temporal verification of higher-order functional programs	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of POPL 2016	6. 最初と最後の頁 57-68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/2837614.2837667	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 Kodai Hashimoto, Hiroshi Unno	4. 巻 9291
2. 論文標題 Refinement Type Inference via Horn Constraint Optimization	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Proceedings of SAS 2015, LNCS	6. 最初と最後の頁 199-216
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-662-48288-9_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 -

1. 著者名 Yohei Ueki, Kazuyuki Narisawa, Ayumi Shinohara	4. 巻 なし
2. 論文標題 A Fast Order-Preserving Matching with q-neighborhood Filtration Using SIMD Instructions	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of SOFSEM 2016	6. 最初と最後の頁 108-115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Diptarama, Yohei Ueki, Kazuyuki Narisawa, Ayumi Shinohara	4. 巻 なし
2. 論文標題 KMP Based Pattern Matching Algorithms for Multi-track Strings	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of SOFSEM 2016	6. 最初と最後の頁 100-107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kobayashi Naoki, Li Xin	4. 巻 -
2. 論文標題 Automata-Based Abstraction Refinement for muHORS Model Checking	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 Proceedings of LICS 2015	6. 最初と最後の頁 713-724
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LICS.2015.71	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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Naoki Kobayashi
2. 発表標題 Ten Years of the Higher-Order Model Checking Project
3. 学会等名 PPDP 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Unno
2. 発表標題 Horn Clauses and Beyond for Relational and Temporal Program Verification
3. 学会等名 HCVS 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林直樹
2. 発表標題 二種類の高階モデル検査とプログラム検証の関係について
3. 学会等名 PPL 2018、チュートリアル
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoki Kobayashi
2. 発表標題 On Two Kinds of Higher-Order Model Checking and Higher-Order Program Verification
3. 学会等名 9th Workshop on Higher-Order Rewriting (HOR 2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoki Kobayashi
2. 発表標題 On Two Higher-Order Extensions of Model Checking
3. 学会等名 FTSCS 2016 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Naoki Kobayashi
2. 発表標題 Program Verification Based on Higher-Order Model Checking
3. 学会等名 Dagstuhl seminar on Language Based Verification Tools for Functional Programs (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Naoki Kobayashi
2. 発表標題 Higher-order model checking and program verification
3. 学会等名 IFIP WG 2.11 meeting (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Naoki Kobayashi
2. 発表標題 Program verification via higher-order model checking
3. 学会等名 IFIP WG 2.2 meeting (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 プログラム検証装置, プログラム検証方法, プログラム検証のためのコンピュータプログラム, プログラム変換器, プログラム変換方法, プログラム変換のためのコンピュータプログラム, プログラム製造方法, 及び...	発明者 今西諒文, 末永幸平, 五十嵐淳	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2017-246154	出願年 2017年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

高階モデル検査
<https://www.kb.is.s.u-tokyo.ac.jp/~koba/hmc/>

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	五十嵐 淳 (Igarashi Atsushi) (40323456)	京都大学・情報学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	篠原 歩 (Shinohara Ayumi) (00226151)	東北大学・情報科学研究科・教授 (11301)	
研究分担者	海野 広志 (Unno Hiroshi) (80569575)	筑波大学・システム情報系・准教授 (12102)	
研究分担者	佐藤 亮介 (Sato Ryosuke) (10804677)	東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教 (12601)	

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

イタリア	University of Bologna			
フランス	Aix-Marseille University			
米国	Princeton University			