

令和 4 年 6 月 16 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03223

研究課題名(和文) プログラミング言語技術との融合による高水準モデリング言語の進化と展開

研究課題名(英文) Evolution and development of high-level modeling languages integrating programming language technologies

研究代表者

上田 和紀 (Ueda, Kazunori)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：10257206

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：グラフ構造を扱いモデル検査器を備える高水準モデリング言語LMNtal、および実数制約を扱い厳密な記号実行系を備える高水準モデリング言語HydLaという二つの言語について、言語的側面と実装技法の双方にまたがる開拓と深化を推進した。言語的側面については、両言語の形式意味論の精査と詳細化を行うとともに、それぞれに対し、明解な意味論に支えられた言語機能の拡張を行った。さらに、LMNtalについてはグラフの型概念の理論および実践両面からの整備、HydLaについては求解過程の最適化をはじめとする多方面の研究をそれぞれ推進し、多くの成果をオープンソース公開中の処理系に反映させた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の最大の学術的および社会的意義は、他の既存ツールでは実現が困難なさまざまなタスクを容易に記述できるモデリング言語とその処理系の進化発展を、理論と実践の両面から推進した点である。学術的には、これらの言語が簡明な理論的基礎に基づいている点で、持続性の高い成果として長期的な波及効果が見込まれる。社会的には、多くの開発合宿をはじめとする努力によって、研究成果のオープンソースツールの形での社会還元を持続的に果たしてきている点が大きな意義である。

研究成果の概要(英文)：We explored the language and the implementation aspects of two high-level modeling languages with a number of unique features. One is LMNtal, a modeling language for handling graph structures that features a model checker, and the other is HydLa, a language for handling constraints on real numbers that features a rigorous symbolic simulator. On the language aspect, we scrutinized and refined the formal semantics of both LMNtal and HydLa and made language extensions supported by clear semantics. Furthermore, for LMNtal, we formalized and implemented static and dynamic notions of graph types, while for HydLa, we conducted diverse studies including the optimization of constraint solving. Many of those outcomes have been integrated into the open-source, publicly available implementations of the languages.

研究分野：プログラミング言語

キーワード：高水準モデリング言語 グラフ書換え ハイブリッドシステム 制約プログラミング 発展可能処理系

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

高水準プログラミング言語は、問題の自然な表現に適した言語機能を用いてプログラムを記述し実行することを目標としている。なかでも非手続き型の高水準言語では「何を計算するか」の記述が主な関心事となり、「どのように実行するか」の記述を分離または省略することができる。このことから、非手続き型言語は、「実行」を目的とするプログラミングに加えて、シミュレーションや検証や解探索などを目的とするモデリングの道具としても重要な役割をもつ。

世の中の現象や人間の知識・経験などを計算機で扱える形に定式化するのがモデリングであるが、既存のモデリング言語の多くは領域特化型であり、汎用のプログラミング言語の機能や諸技法が幅広い理論研究に支えられ発展してきたのに対し、モデリング言語の機能や諸技法は個々の領域の中での発展が主体であった。

これに対して研究代表者らは、プログラミングとモデリングの境界領域の開拓を目指して、汎用性の高いモデリング手段であるグラフ構造と工学全般で不可欠な実数という二つのデータ領域に着目し、それぞれを扱うモデリング言語を開発するとともに、モデル検査に代表される検証機能と通常の計算とを統合的な枠組で提供する言語処理系を開発し、多くの知見を蓄積してきた。

## 2. 研究の目的

本研究は、グラフ構造や実数など、情報学にとどまらない高い汎用性と表現力をもつデータ領域を扱うモデリング言語とその実行・検証系を発展させて可用性と性能を格段に高めることを目標に、プログラミング言語分野で培われた先進技術とモデリング言語の先進技術との融合を図ることを目的とする。新たな概念と機能を備えた高性能な実行系・検証系を構築し、多様なモデリング経験を蓄積しながらその有用性を高めてゆく。

理論から処理系構築に基づく実証研究までをカバーする研究のプラットフォームとして、グラフ構造と書換えを主軸とする言語モデル LMNtal とその処理系、および実数と制約処理を主軸とする言語モデル HydLa とその処理系を出発点に据え、高階概念、抽象化、型体系、メタプログラミングなど、プログラミング言語での有用性が認められている概念を根本から再検討しつつ、それらの段階的導入を図る。

## 3. 研究の方法

研究の基盤となる二つのモデリング言語とその実行・検証系（オープンソース公開中）は、運用実績を積み重ねつつ、さまざまな研究開発課題を新たに産み出してきた。本研究ではこのような研究開発活動の中で、特にモデリング言語の発展に必要な言語機能に焦点を当てて、他の高水準プログラミング言語の基礎理論の研究なども参考にしつつ、対象言語の基礎検討を推進する。両言語に共通の課題として、形式意味論の精査を通じてその詳細化を推進する。また、さまざまなグラフ書換えモデルやハイブリッドオートマトンなど、両言語に関連する計算モデルとの関連づけを進める。LMNtal についてはさらに、これまであまり進められてこなかった型概念についての研究開発を多面的に推進する。

## 4. 研究成果

本研究の成果は基礎理論から処理系の発展改良まで多岐にわたるが、いくつかの重要な柱を以下に順次説明する。

### (1) ハイパーグラフ書換え系およびグラフ書換え系の形式意味論の整備

頂点と辺からなる通常のグラフ構造の重要な拡張として、多点間を接続するハイパー辺を許すハイパーグラフがある。ハイパーグラフとその書換えを扱う HyperLMNtal が LMNtal の拡張言語として設計・実装され、実用に供されてきたが、拡張機能の形式的意味論への統合が課題となっていた。また、グラフ理論におけるハイパーグラフ構造の定義は、頂点集合、辺集合、頂点から辺への対応とラベリング関数などからなるが、これは 計算や 計算をはじめとする多くの計算モデルのような構文主導の形式化と異なる。そこで、プロセス代数における名前の隠蔽の構文・意味論を HyperLMNtal に組み込むことで、ハイパーグラフ書換え系の構文主導でかつ compositional な構文と意味論を構築した。また、その上でいくつかの基本的な性質の証明を行い、形式化の妥当性を確認した。これによって、ハイパーグラフ構造を単に HyperLMNtal のみでなく、構造的操作的意味論をもつ他のプログラミング言語にもスムーズに組み込むために基礎を築くことができた。さらに本研究の副次的成果として、LMNtal のデータ構造のグラフとしての解釈を長年にわたって支えてきている構造合同規則の中に、admissible な（つまり他の規則から証明可能な）ものが含まれていることが初めて発見された。

形式意味論の整備の一環として、今後の理論および実践研究の強固な基盤を与えるべく、LMNtal の構文と意味論を証明支援系 Coq 上で表現して、いくつかの重要な性質を証明した。

## (2) ハイパーグラフのマッチングのための型概念と変数束縛をもつ形式体系への応用

ハイパーグラフ書換えに基づくプログラミングやモデリングにおいては、特定の形状のハイパーグラフとマッチするワイルドカード機能が実用上重要な役割を果たす。ワイルドカード機能は、グラフの複製や消去といった基本操作のためにグラフの走査アルゴリズムを記述する必要をなくす点で、プログラムの簡潔化に大きく役立つ。ワイルドカードは、特定の型に属するグラフの集合を表すと解釈できる。この特定の形状を表すいくつかのグラフ型が過去に提案・実装され、他のさまざまな計算モデルのエンコード等に応用されてきた。中でも重要な用途は、計算のような名前束縛をもつ形式的体系のモデリングであり、HyperLMNtal は強い簡約を行う計算の簡潔なエンコードが可能であることを特徴としていた。しかしハイパーグラフのための型概念は研究の途上で、我々の最近の研究でも、同値を適切に扱うハイパーグラフ単一化アルゴリズムの簡潔な記述には、既存のグラフ型概念の改良が必要であることが判明していた。そこで本研究では、名前束縛をもつ形式的体系のモデリングに真に適したグラフ型概念の再設計と実装を行い、既存の技法と比べた効率改善を実験的に確認した。またこの型概念を公開中の処理系に組み込んだ。

本研究で確立した ground 型の概念は、ハイパーグラフにおける 1 対 1 リンクとハイパーリンクが多くあるモデリングで異なる役割を果たすことに着目したもので、簡明な意味論をもつ。たとえば 式のモデリングでは、式の木構造は 1 対 1 リンクで表現され、変数束縛構造はハイパーリンクで表現される。

## (3) 生成文法に基づくグラフ型概念の定式化と実装

命令型言語での (誤りを冒しがちで複雑な) ポインタ操作や、関数型言語に参照型を導入する方法に代えて、高水準プログラミング言語や高水準モデリング言語でグラフ構造とその変化を安全かつ簡明に扱えるようにすることは、言語設計における重要な目標と言える。LMNtal によるグラフ操作は、グラフに対する操作がグラフの良型性 (well-formedness) を保存し、dangling ポインタ等を生成しないことを言語レベルで保証してくれる。

一方、グラフ構造の形はリストや木などの代数的データ構造と比べて一般に複雑かつ多様になるため、個別のプログラムの性質の理解や検証のためにグラフの型の概念を定式化することが、自明でなくかつ重要な研究目標となる。この動機から本研究では、LMNtal Shapetype という型検査のための枠組を設計し実装した。LMNtal Shapetype は既存の Structured Gamma の基本概念を具体的な言語に応用したもので、型は LMNtal の書換え規則を用いた生成文法により記述し、型検査は LMNtal 処理系のモデル検査機能を応用することで実現している。

文脈自由グラフ型はすでに文字列のための文脈自由文法を超える表現力をもつが、本研究では型の表現力と型検査アルゴリズムの能力とのバランスを考えつつ、文脈自由グラフ型のスーパークラスとしてのインデックス型および単調型を定式化して、それらの性質を考察した。また、複数の書換えステップを要する操作や、操作の前後で型が変化する操作の型を扱うために関数的アトム概念を新たに導入して定式化を行った。

実践的側面では、LMNtal メタインタプリタの研究成果 (項目(5)) を活用することでグラフおよび書換え規則の型検査を実装し、さまざまなグラフ構造の操作の型安全性が検査可能であることを確認した。書換え規則の型保存性の検査は、文脈自由グラフ文法に限定しても本質的に決定不能問題であるため、技法の有効性の確認は主に例題に基づいて行うこととなるが、型検査に成功した例には、スキップリストのような非代数的データ構造に対する操作、赤黒木のような数値制約をもつデータ構造への操作などが含まれる。

## (4) 抽象化に基づくグラフ対称性の改善技法とグラフ書換えモデル検査への応用

LMNtal の実行系はモデル検査器を備えることを大きな特徴としている。また一般にグラフ構造は、状態の対称性をグラフ同型性概念によって自然に扱えることを大きな特徴とする。モデル検査における symmetry reduction とは、状態の対称性、すなわちその構成要素を入れ替えても状態が変化しないことを活用した状態空間削減技法であるが、検査対象となるモデルにおいて、モデル検査の結果に直接関係しない部分を捨象するモデル抽象化操作は、しばしば対称性を向上させて状態空間削減に貢献する。

LMNtal のようなグラフ書換え系では、対称性の自然な表現とモデル抽象化による対称性改善との相乗効果を期待することができる。そこで本研究では、LMNtal で記述されたプログラムの中でモデル検査の結果に影響しないサブグラフを発見して捨象する抽象化技法を新たに提案した。本技法は、新たな抽象データ領域やモデリング言語を導入することなく、LMNtal の構文と形式意味論の枠組の中で定式化することができた。これを LMNtal モデル検査器 SLIM 上に実装してさまざまな並行アルゴリズムをモデル検査し、提案技法がモデルの対称性を抽出して状態数を自動的に削減することを確認した。

## (5) メタプログラミングによる拡張可能モデル検査

LMNtal の大きな特徴は、実行系 SLIM が状態空間探索および LTL モデル検査を行う検証系の機能を備えていることである。これまで、SLIM 検証系に対しては多くの機能拡張が試みられてきたが、それらはすべて実装言語である C コードの変更によって達成されてきた。もしモデル検査器がモデリング言語自身で実装されていれば、ベース実装を変更することなくさまざまなモデル検査器のプロトタイプを開発することが可能になる。この手法はメタプログラミングと呼ばれ、Lisp および Prolog コミュニティで広く用いられてきた。

この動機から、拡張可能なモデル検査器のフレームワークの設計を行った。まず、モデリング言語の拡張のために第一級の書換え規則を設計し、次に、プログラムの状態を操作するための API (application program interface) を設計した。これらの機能は、プログラマが状態遷移グラフを第一級オブジェクトとして扱い、SLIM 自体を変更せずにモデル検査器の機能を拡張したり変更したりすることを可能にする。このことを、実際に LTL モデル検査器の変種および CTL モデル検査器を実装することで立証した。さらに、実装した CTL モデル検査器に公平性制約を付加する実験を通じて、提案する枠組がモデル検査器の拡張を容易にすることを確認した。メタインタプリタの利用はオーバーヘッドを伴うが、速度低下を約一桁以下に抑えることができた。これらの成果は、明示的な状態空間を柔軟に扱うことができるメタインタプリタベースの枠組の有用性を示すものである。構築した API は公開版の SLIM に統合されている。

## (6) HydLa の宣言的意味論の詳細化

本研究組織で研究開発を推進しているハイブリッドシステムモデリング言語 HydLa は、他のオートマトンベースのハイブリッドシステム計算モデルと異なり、制約概念に基づく定式化を特徴としている。特に、制約どうしの中に優先度を導入する制約階層概念が、モデリングの簡潔化に大きく貢献している一方、形式意味論における研究課題となっている。

HydLa の宣言的意味論は当初の提案以来、修正と詳細化を経て、実装のベースとなる操作的意味論の基盤を与えてきたが、不連続点をもつ解軌道を扱うために「暗黙の連続性」と呼ばれるフレーム公理を導入していた。暗黙の連続性とは、プログラム中の制約がある変数の微分に言及するならば、その変数は暗黙的に連続であると仮定するものだが、この仮定の優先度の設定などに精査の余地があった。特に、プログラムの等価性やプログラム変換の正当性などを論じるためには、宣言的意味論から得られる解集合が明確に定まるかどうかを再検討し、定理証明支援系を用いた形式的手法によって解計算の妥当性を検証することが必要と認識した。

そこで本研究では、まず既存の宣言的意味論を例題に基づいて検討した。その結果、軌道概念の再定義および暗黙の連続性の扱い方の改良の必要性が判明した。これを受け、値域を拡張した軌道の概念を新たに定義し、その極限、連続性、微分なども定義した。これに基づき、暗黙の連続性を必要に応じて動的に付加する宣言的意味論を構築した。例題を用いて、提案した意味論が例題の解軌道を一意かつ自然に定めることを示し、その系として二つの例題プログラムの等価性を証明した。

また、再定義した軌道や宣言的意味論について、定理証明支援系 Coq を用いた実装と検証を行った。軌道については大きく二つのことを示した。一つは、値が実数値をとる区間では、極限、連続性、微分を通常の実数上関数と同様に考えて良いということである。二つめとして、値が (bottom) になる点では左連続性、右連続性、連続性は成り立たず、微分値も になることを示した。宣言的意味論については、パラメタを含む例題に対して、そのパラメタを含むある軌道が解となること、およびその系として、パラメタに具体値を代入した任意のプログラムが解となることを証明した。

## (7) HydLa 処理系の機能およびスケーラビリティの拡張

HydLa の記号実行シミュレータ HyLaGI に対してさまざまな改良・拡張作業を行った。

言語機能面では、HydLa の言語仕様で当初から構想されていた、制約や制約階層の動的生成機能を新たに実装した。これによって、質点の数が動的に増加する力学系など、動的に発展する系の記述が容易にできるようになった。性能面では、HyLaGI の記号実行アルゴリズムに対して、過去の制約求解結果の再利用を可能にする技法を複数のアプローチから検討し、確立した技法を HyLaGI に組み込んだ。

HyLaGI のシミュレーションは記号計算に基づくが、多数の数式や複雑な数式が入力されると計算コストがかかることが多く、長いフェーズのシミュレーションは求解に失敗することもある。そこで本研究では、HyLaGI の主要な記号計算手続きに最適化を施し、計算コストの削減を試みた。まず、HyLaGI の各フェーズの制約解消において、過去に行った計算を再利用することで同じ計算が繰り返されることを抑制し、長いフェーズのシミュレーションに耐えうように最適化を施した。これによって制約解消のコストが大きい問題の実行時間を短縮することができた。また、離散変化の原因が多数ある場合、HyLaGI はそのうちのどれが最初に発生するかを判定するための最小化問題をすべての候補原因を対象に解くが、これが実行のボトルネックとなってしまうことがある。そこで、離散変化原因の探索に分枝限定法を導入し、不要な解探索を

回避する最適化を施した。これによって、モチベーションとなる例題において、離散変化時刻の最小化問題を解く回数を候補原因の数に依存しない回数に削減することができた。

制約求解結果の再利用へのもう一つの重要なアプローチとして、制約概念に基づく HydLa モデルをハイブリッドオートマトンに変換するアルゴリズムとその実装の評価と改良を進めた。HydLa モデルのハイブリッドオートマトンへの変換は、HydLa モデルの記号実行から得られる情報をもとに行われる。これは HydLa モデルの非有界モデル検査の鍵となる技法であるが、有限状態オートマトンを得るためには、記号実行の初期値を必要に応じて適切に抽象化して、過去に生成された記号状態に含まれない状態が無限に生成されることを避ける必要がある。パラメタ探索に基づく自動抽象化はパラメタ数の増大に伴って急速に困難化するが、自動抽象化に向けて例題に基づく評価検討を進めた。

#### (8) ハイブリッドシステムの高信頼シミュレーションのための要素技術

ハイブリッドシステムの高信頼シミュレーション・到達性解析を実施するツールの高信頼な実装を目指し、当該ツールのプロトタイプ実装を行った。実装したツール (OCaml で実装) は、ハイブリッドシステムのモデルを入力とし、解軌道を包囲する区間集合を計算する。実装にあたっては、4 つの書き換え規則に基づく既存の操作的意味論と、精度保証付き計算のための区間演算を利用し、各ステップが形式化された実装を試作することができた。

精度保証付き数値計算の基本手法である区間演算の高信頼なライブラリ実装に取り組んだ。本研究では、区間の四則演算と累乗演算を対象にプログラム検証を実施した。各演算を実装した関数を用意し、通常の演算について通常の区間が得られること、結果が真解を含むこと、結果がタイトな区間であることを検証し、最終的に検証済みコードを生成した。検証とコード生成には、Why3 プラットフォーム (プラグインとして Alt-Ergo と Coq を含む) を利用し、半自動的に実施した。事前・事後条件の簡潔な記述方法や、検証を自動化するための補助定理などを明らかにすることができた。

モデリングツールの Simulink または Lustre を用いて離散時間の動的システムを部品化して記述し、部品構造を利用して到達性解析を実施する手法を検討した。検証結果を統合するために、既存の Assume-Guarantee 規則と、独自の時間伸縮規則を検討した。複数の例題について、部品毎に到達性解析を実施した後、手で前記規則を適用し、システム全体の解析を効率よく実施できることを確かめた。

#### (9) 集中作業によるモデリング言語処理系の整備と発展

以上に述べた個別の研究項目に加えて、各年度それぞれ複数回の集中作業合宿 (コロナウィルスによる制限期間中はオンライン合宿) を、研究協力者を含む大学院生、学部学生と実施して、GitHub からオープンソース公開中の LMNtal および HydLa 両処理系に対して、研究成果の反映を含むさまざまな改良作業を行った。

特に LMNtal の実行系 SLIM については C から C++ への記述言語変更とそれに伴う全面的改良、コンパイラについては統合環境を活用した大規模なコード改良と、不要コードの発見除去をはじめとする整備作業を実施した。また十数万行規模の処理系のスムーズな維持発展を支援するために CI (continuous integration) の環境を整備した。

さらに、(1) ~ (8) に詳述しなかったいくつかの実験的新機能を LMNtal コンパイラおよび SLIM に組み込んだ。これには、グラフのパターンマッチングにおいて、部分グラフの存在だけでなく、「すべての ~ に必ず ~ が接続されている」といった全称量化を伴う条件や、特定の部分グラフの不存在条件の記述を許す機能、およびユーザ定義のグラフ型 (文字列における正規表現にほぼ相当) をグラフのパターンマッチングに活用するための機能などが含まれる。

コンパイラと実行系にとどまらず、LMNtal についてはグラフ書換えの可視化環境 Graphene の整備、HydLa についてはウェブサービス webHydLa の機能強化なども実施した。多岐にわたるこれらの作業を通じて、国内外の他のツールにはない機能を多数備えたモデリング・シミュレーション・検証の統合環境としての処理系の発展を推進した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 3件）

|  |                             |
|--|-----------------------------|
| 1. 著者名<br>Daisuke Ishii, Takashi Tomita, Toshiaki Aoki   | 4. 巻<br>13260               |
| 2. 論文標題<br>Approximate Translation from Floating-Point to Real-Interval Arithmetic             | 5. 発行年<br>2022年             |
| 3. 雑誌名<br>ASA Formal Methods (NFM), Lecture Notes in Computer Science                          | 6. 最初と最後の頁<br>733-751       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/978-3-031-06773-0_39                                       | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Alimujiang Yasen and Kazunori Ueda   | 4. 巻<br>9                   |
| 2. 論文標題<br>Revisiting Graph Types in HyperLMNtal: A Modeling Language for Hypergraph Rewriting | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>Revisiting Graph Types in HyperLMNtal: A Modeling Language for Hypergraph Rewriting  | 6. 最初と最後の頁<br>133449-133460 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/ACCESS.2021.3112903  | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する                |
| 1. 著者名<br>Naoki Yamamoto and Kazunori Ueda   | 4. 巻<br>-                   |
| 2. 論文標題<br>Engineering Grammar-based Type Checking for Graph Rewriting Languages               | 5. 発行年<br>2021年             |
| 3. 雑誌名<br>Proc. Twelfth International Workshop on Graph Computation Models (GCM 2021)          | 6. 最初と最後の頁<br>93-114        |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |
| 1. 著者名<br>Daisuke Ishii and Saito Fujii  | 4. 巻<br>-                   |
| 2. 論文標題<br>Formalizing the Soundness of the Encoding Methods of SAT-based Model Checking       | 5. 発行年<br>2020年             |
| 3. 雑誌名<br>International Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering (TASE)        | 6. 最初と最後の頁<br>105-112       |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1109/TASE49443.2020.00023                                       | 査読の有無<br>有                  |
| オープンアクセス<br>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<br>-                   |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Taichi Tomioka, Yutaro Tsunekawa and Kazunori Ueda  | 4. 巻<br>11629      |
| 2. 論文標題<br>Introducing Symmetry to Graph Rewriting Systems with Process Abstraction                                 | 5. 発行年<br>2019年    |
| 3. 雑誌名<br>roc. 12th International Conference on Graph Transformation (ICGT 2019), Lecture Notes in Computer Science | 6. 最初と最後の頁<br>3-20 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/978-3-030-41131-2_8   | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|  |                       |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名<br>Yunosuke Yamada, Masashi Sato and Kazunori Ueda  | 4. 巻<br>11971         |
| 2. 論文標題<br>Constraint-based modeling and symbolic simulation of hybrid systems with HydLa and HyLaGI                                       | 5. 発行年<br>2020年       |
| 3. 雑誌名<br>Proc. 9th International Workshop on Model-Based Design of Cyber-Physical Systems (CyPhy 2019), Lecture Notes in Computer Science | 6. 最初と最後の頁<br>153-178 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1007/978-3-030-41131-2_8  | 査読の有無<br>有            |
| オープンアクセス<br>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<br>-             |

|   |                    |
|---|--------------------|
| 1. 著者名<br>Daisuke Ishii, Tomohito Yabu  | 4. 巻<br>377        |
| 2. 論文標題<br>Computer-assisted verification of four interval arithmetic operators | 5. 発行年<br>2020年    |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Computational and Applied Mathematics                      | 6. 最初と最後の頁<br>1-13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.cam.2020.112893                           | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Alimujiang Yasen and Kazunori Ueda             | 4. 巻<br>E101-D          |
| 2. 論文標題<br>Name Binding is Easy with Hypergraphs         | 5. 発行年<br>2018年         |
| 3. 雑誌名<br>IEICE Transactions on Information and Systems  | 6. 最初と最後の頁<br>1126-1140 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1587/transinf.2017EDP7257 | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>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<br>該当する            |

|  |                      |
|--|----------------------|
| 1. 著者名<br>Yutaro Tsunekawa, Taichi Tomioka and Kazunori Ueda                   | 4. 巻<br>17           |
| 2. 論文標題<br>Implementation of LMNtal Model Checkers: a Metaprogramming Approach | 5. 発行年<br>2018年      |
| 3. 雑誌名<br>The Journal of Object Technology                                     | 6. 最初と最後の頁<br>1:1-28 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>なし   | 査読の有無<br>有           |
| オープンアクセス<br>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<br>-            |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 1. 著者名<br>Kazunori Ueda  | 4. 巻<br>164        |
| 2. 論文標題<br>Logic/Constraint Programming and Concurrency: The Hard-Won Lessons of the Fifth Generation Computer Project | 5. 発行年<br>2018年    |
| 3. 雑誌名<br>Science of Computer Programming  | 6. 最初と最後の頁<br>3-17 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子)<br>10.1016/j.scico.2017.06.002  | 査読の有無<br>有         |
| オープンアクセス<br>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<br>-          |

〔学会発表〕 計45件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>橋本 彩美, 上田 和紀                        |
| 2. 発表標題<br>差分制約を含んだ時間オートマトンモデルのLMNtalによる状態空間構築 |
| 3. 学会等名<br>2021年度人工知能学会全国大会                    |
| 4. 発表年<br>2021年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>秦国大, 上田和紀                                    |
| 2. 発表標題<br>パラメタ付きモデルの到達可能性解析に基づくハイブリッドシステムモデリングツールの性能評価 |
| 3. 学会等名<br>2021年度人工知能学会全国大会                             |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>山本直輝, 上田和紀                 |
| 2. 発表標題<br>定理証明支援系Coqによるグラフ書換え言語の性質証明 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第38回大会          |
| 4. 発表年<br>2021年                       |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>鈴木遼, 上田和紀, 坂井滋和                                    |
| 2. 発表標題<br>情報可視化やインタラクションのためのライブラリSiv3Dの機能強化とC++17, C++20への対応 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第38回大会                                  |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐野仁, 上田和紀                                  |
| 2. 発表標題<br>ハイパーグラフ書き換え系への構文駆動でcompositionalな構文・意味論の提案 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第38回大会                          |
| 4. 発表年<br>2021年                                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>今川連, 上田和紀                       |
| 2. 発表標題<br>グラフ書換え言語LMNtalにおける閉包計算のマッチング最適化 |
| 3. 学会等名<br>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  |
| 4. 発表年<br>2022年                            |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山田啓太, 上田和紀                       |
| 2. 発表標題<br>グラフ書き換え言語LMNtalにおけるパーサコンピネータ実装手法 |
| 3. 学会等名<br>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   |
| 4. 発表年<br>2022年                             |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐野仁, 上田和紀                      |
| 2. 発表標題<br>参照を用いたデータ構造の形状のユーザ定義の型に基づく型検査  |
| 3. 学会等名<br>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 |
| 4. 発表年<br>2022年                           |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山田 悠之介, 上田 和紀                          |
| 2. 発表標題<br>制約に基づくハイブリッドシステムモデリング言語HydLaの宣言的意味論 拡張 |
| 3. 学会等名<br>2020年度人工知能学会全国大会                       |
| 4. 発表年<br>2020年                                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>恒川 雄太郎, 上田 和紀                                       |
| 2. 発表標題<br>グラフ書き換えモデル検査におけるグラフ自己同型に基づく効率的なSymmetry Reduction手法 |
| 3. 学会等名<br>2020年度人工知能学会全国大会                                    |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|                                       |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>山本 直輝, 上田 和紀               |
| 2. 発表標題<br>グラフ書換え言語における数値制約を伴う型の静的型検査 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第37回大会          |
| 4. 発表年<br>2020年                       |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>橋本 彩美, 恒川 雄太郎, 上田 和紀                |
| 2. 発表標題<br>グラフ書き換え言語LMNtalによる時間オートマトンのゾーングラフ構築 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第37回大会                   |
| 4. 発表年<br>2020年                                |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Stefan Walter, Kazunori Ueda                              |
| 2. 発表標題<br>Capability Typing for HyperLMNtal                         |
| 3. 学会等名<br>18th Asian Symposium on Programming Languages and Systems |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐野 仁, 上田 和紀                    |
| 2. 発表標題<br>HyperLMNtalを用いたG-Machineの実装    |
| 3. 学会等名<br>第23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<br>2020年                           |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>中田 昌輝, 上田 和紀                              |
| 2. 発表標題<br>グラフ書き換え言語LMNtalにおける非連結サブグラフパターンマッチング高速化手法 |
| 3. 学会等名<br>第23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<br>2020年                                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>堀内 貴文, 上田 和紀  |
| 2. 発表標題<br>Dynamic Reduction of Guarded Constraints for the Hybrid Systems Modeling Language HydLa |
| 3. 学会等名<br>2019年度人工知能学会全国大会 (第33回)   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤 証史, 上田 和紀                             |
| 2. 発表標題<br>ハイブリッド制約処理系HyLaGIにおける分枝限定法を用いた離散変化時刻導出手法 |
| 3. 学会等名<br>2019年度人工知能学会全国大会 (第33回)                  |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>恒川 雄太郎, 上田 和紀                      |
| 2. 発表標題<br>グラフ書き換えモデル検査器SLIMへの差分適用グラフ正規化手法の実装 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第36回大会                  |
| 4. 発表年<br>2019年                               |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>村上 椋星, 藪智仁, 石井大輔       |
| 2. 発表標題<br>Why3を用いた区間べき関数のプログラム検証 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第36回大会      |
| 4. 発表年<br>2019年                   |

|                                    |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>山本 直輝, 上田 和紀            |
| 2. 発表標題<br>グラフ書換え言語におけるグラフ操作の静的型検査 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第36回大会       |
| 4. 発表年<br>2019年                    |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>桑原拓也, 恒川雄太郎, 齋藤諒人, 上田和紀               |
| 2. 発表標題<br>対称性の高い大規模ICTシステム更新に対する効率的な更改手順の自動計画手法 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会情報通信マネジメント研究会                 |
| 4. 発表年<br>2019年                                  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Naoki Yamamoto and Kazunori Ueda  |
| 2. 発表標題<br>Grammar-based Static Type Checking for Graph Rewriting                        |
| 3. 学会等名<br>17th Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS 2019) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>野村 亮太, 石井 大輔           |
| 2. 発表標題<br>区間制約ソルバにおけるパラメータ化制約の導入 |
| 3. 学会等名<br>情報処理学会第82回全国大会         |
| 4. 発表年<br>2020年                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>白石 篤至, 恒川 雄太郎, 上田 和紀                      |
| 2. 発表標題<br>LMNtalにおける部分グラフのリサイクルを行うコンパイル時最適化         |
| 3. 学会等名<br>第22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 2020) |
| 4. 発表年<br>2020年                                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>横井 駿平, 山本 直輝, 上田 和紀                       |
| 2. 発表標題<br>階層グラフ書き換え言語LMNtalにおける継続の概念の提案と実装          |
| 3. 学会等名<br>第22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 2020) |
| 4. 発表年<br>2020年                                      |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>恒川 雄太郎, 上田 和紀                       |
| 2. 発表標題<br>グラフ書き換え言語LMNtalによる容易に拡張可能なモデル検査器の実装 |
| 3. 学会等名<br>2018年度 人工知能学会全国大会 (第32回)            |
| 4. 発表年<br>2018年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>増田 健太, 上田 和紀                                 |
| 2. 発表標題<br>ハイブリッド制約言語HydLaにおける非線形常微分方程式の表現とその記号付き精度保証計算 |
| 3. 学会等名<br>2018年度 人工知能学会全国大会 (第32回)                     |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤 証史, 上田 和紀                                   |
| 2. 発表標題<br>ハイブリッドシステムモデリング言語HydLaにおける変数と制約階層の動的生成記法の設計と実装 |
| 3. 学会等名<br>2018年度 人工知能学会全国大会 (第32回)                       |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|                                     |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>上田 和紀                    |
| 2. 発表標題<br>言語をつくる                   |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第35回大会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2018年                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>佐藤 証史, 上田 和紀                        |
| 2. 発表標題<br>実行パスの動的解析によるハイブリッドシステム処理系HyLaGIの最適化 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第35回大会                   |
| 4. 発表年<br>2018年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>齋藤 諒人, 上田 和紀                     |
| 2. 発表標題<br>階層グラフ書換え言語LMNtalの否定表現の拡張と全称量化の実現 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第35回大会                |
| 4. 発表年<br>2018年                             |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Naoki Yamamoto, Kazunori Ueda     |
| 2. 発表標題<br>純粹型なし・型付きラムダ計算の実用的かつ高機能なインタプリタの実装 |
| 3. 学会等名<br>日本ソフトウェア科学会第35回大会                 |
| 4. 発表年<br>2018年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Ryoto Saito and Kazunori Ueda  |
| 2. 発表標題<br>Introducing Negation and Universal Quantification into the Graph Rewriting Language LMNtal |
| 3. 学会等名<br>16th Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS2018) (国際学会)               |
| 4. 発表年<br>2018年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yutaro Tsunekawa and Kazunori Ueda  |
| 2. 発表標題<br>Implementation of Effective Symmetry Reduction for a Model Checker based on Graph Rewriting |
| 3. 学会等名<br>16th Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS2018) (国際学会)                |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>田村 滉明, 上田 和紀, 富岡 太一                      |
| 2. 発表標題<br>グラフの内包記法の実現に向けたLMNtalにおけるメッシュ構造の定義検討     |
| 3. 学会等名<br>第21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 (PPL2019) |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>山田 悠之介, 上田 和紀                            |
| 2. 発表標題<br>ハイブリッド制約処理系HyLaGIへの共通部分式除去を用いた式の簡約の導入    |
| 3. 学会等名<br>第21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 (PPL2019) |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>佐藤 証史, 上田 和紀                             |
| 2. 発表標題<br>ハイブリッド制約処理系HyLaGIにおける分枝限定法を用いた離散変化時刻導出手法 |
| 3. 学会等名<br>第21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 (PPL2019) |
| 4. 発表年<br>2019年                                     |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>山本 直輝, 上田 和紀                              |
| 2. 発表標題<br>グラフ書換え言語における静的型体系LMNtal ShapeTypeの再定式化と拡張 |
| 3. 学会等名<br>第21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 (PPL2019)  |
| 4. 発表年<br>2019年                                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>渋井隆弘, 上田和紀                           |
| 2. 発表標題<br>ハイブリッドシステムモデリング言語HydLaを用いたDAEシステムの解析 |
| 3. 学会等名<br>情報処理学会第81回全国大会                       |
| 4. 発表年<br>2019年                                 |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Tomohito Yabu, Daisuke Ishii  |
| 2. 発表標題<br>Machine-Aided Verification of Four Interval Arithmetic Operators  |
| 3. 学会等名<br>International Symposium on Scientific Computing, Computer Arithmetic, and Verified Numerical Computations (SCAN) (国際学会) |
| 4. 発表年<br>2018年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>石井大輔, 藪 智仁                        |
| 2. 発表標題<br>Why3を用いた区間演算ライブラリの検証              |
| 3. 学会等名<br>第2回 精度保証付き数値計算の実問題への応用研究集会 (招待講演) |
| 4. 発表年<br>2018年                              |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>藤井采人, 石井大輔                   |
| 2. 発表標題<br>証明支援系Coqを用いた有界モデル検査アルゴリズムの検証 |
| 3. 学会等名<br>第16回ディベダブルシステムワークショップ        |
| 4. 発表年<br>2018年                         |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>藪 智仁, 石井大輔             |
| 2. 発表標題<br>Why3を用いた区間演算プログラムの検証   |
| 3. 学会等名<br>第16回ディベンドブルシステムワークショップ |
| 4. 発表年<br>2018年                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>小嶋翔太, 石井大輔                                |
| 2. 発表標題<br>Duraczらの操作的意味論に基づくハイブリッドシステムの高信頼シミュレータの実装 |
| 3. 学会等名<br>電子情報通信学会システム数理と応用研究会                      |
| 4. 発表年<br>2019年                                      |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>藤井采人, 石井大輔                   |
| 2. 発表標題<br>証明支援系Coqを用いた有界モデル検査アルゴリズムの検証 |
| 3. 学会等名<br>情報処理学会プログラミング研究会             |
| 4. 発表年<br>2019年                         |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

|  |
|--|
| <p>LMNtal: モデル検査機能と可視化環境を備えた階層グラフ書換え言語処理系<br/> <a href="https://www.ueda.info.waseda.ac.jp/lmntal/">https://www.ueda.info.waseda.ac.jp/lmntal/</a><br/> LMNtal Github<br/> <a href="https://github.com/lmntal/">https://github.com/lmntal/</a><br/> 制約概念に基づくハイブリッドシステムモデリング言語HydLa<br/> <a href="https://www.ueda.info.waseda.ac.jp/hydla/">https://www.ueda.info.waseda.ac.jp/hydla/</a><br/> webHydLa: an online IDE of HydLa with a visualizer<br/> <a href="http://webhydla.ueda.info.waseda.ac.jp/">http://webhydla.ueda.info.waseda.ac.jp/</a><br/> HydLa: a modeling language for hybrid systems<br/> <a href="https://github.com/hydla">https://github.com/hydla</a></p> |
|--|

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                              | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 石井 大輔<br><br>(Ishii Daisuke)<br><br>(00454025) | 北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授<br><br><br><br>(13302) |    |

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                      | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                   | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究協力者 | 恒川 雄太郎<br><br>(Tsunekawa Yutaro)               |   |    |
| 研究協力者 | 山本 直輝<br><br>(Yamamoto Naoki)                  |   |    |
| 連携研究者 | 佐藤 雅彦<br><br>(Sato Masahiko)<br><br>(20027387) | 京都大学・情報学研究科・名誉教授<br><br><br><br>(14301) |    |

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 |  |  |  |
|---------|---------|--|--|--|
| フランス    | ナント大学   |  |  |  |