

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：13302

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2022

課題番号：18H03220

研究課題名（和文）次世代車載システムのための形式手法に関する研究

研究課題名（英文）Study on formal methods for next-generation automotive systems

研究代表者

青木 利晃（Aoki, Toshiaki）

北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：20313702

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、次世代車載システムを対象として、それらの高信頼性と高安全性を実現する形式手法を提案した。次世代車載システムでは、知能化システムに由来する不確実性、画像や動画を含む多様で大量のデータの取扱、高度な制御に由来する計算の複雑さに関する問題がある。本研究では、従来の形式手法を拡張・特化した手法、および、新規の形式手法を提案し、これらの問題を解決・緩和した。実践的な手法となるよう別手法との組み合わせた解決策も提案した。提案手法は、オープンデータセットや公開文書を用いて評価した。成果の一部は、商用ツールとしてリリースすることにも成功した。これらのことから、実践的な手法が提案できたと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

形式手法は、一筋縄では実践が行えないため、実践のための理論や技術も学術的な研究の対象である。本研究では、形式手法を用いた複数の実践例を示すことができ、次世代車載システムのような先進システムにおいても形式手法が有効であることを示すことができた。これは、当該分野の発展に大きく貢献すると考えている。また、本研究では、提案手法に基づいたツールを実装し、商用ツール、および、オープンソースとしてリリースした。これらは、産業界に直接的に還元できるものである。本研究の成果が普及することにより、自動車に限らず、同様の先進システムの信頼性・安全性が格段に高くなり、安全・安心な社会構築へ貢献することが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, we proposed a formal method and a verification method for next-generation automotive systems to achieve their high reliability and high safety. The next-generation automotive systems face problems regarding uncertainty coming from intelligent systems, handling of a large amount of diverse data including images and videos, and computational complexity arising from advanced control. In this research, we proposed an extended and specialized version of conventional formal methods as well as new formal methods to solve and mitigate these problems. We also proposed solutions in combination with the other methods such as testing, modeling, and simulation to make our formal methods practical. We demonstrated the effectiveness of our method using open datasets and public documents. In addition, some of the research results have been successfully released as a commercial tool. Thus, we can say that we succeeded in proposing a practical method.

研究分野：ソフトウェア工学

キーワード：形式手法 形式検証 形式仕様記述 車載システム ハイブリッドシステム モデル検査 充足可能性
判定 テスト

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

車載システムの信頼性、安全性に関する問題は、社会において非常に大きな関心となりつつある。また、現在、近未来における自動運転の実現という目標が全世界的な関心事となっており、車載システムがさらに劇的に大規模化、複雑化することは明白である。産業界のみならず学術界でも、次世代の超複雑な車載システムの安全性と信頼性をどのように担保するかが懸念されている。そこで、本研究では、形式手法に基づいた次世代車載システムの開発手法を提案する。形式手法は、機能安全の国際規格である IEC 61508 や ISO 26262 において、高い安全性が必要な部分への適用が推奨されており、また、高信頼システム開発に向いている。形式手法は、数学や論理学に基づいてソフトウェア開発を行う手法の総称であり、1970年代から欧米を中心に研究が行われている。形式手法は、一筋縄では実践が行えないため、実践のための理論や技術も学術的な研究の対象となっている。形式手法の実践応用に関する研究では、鉄道システムや航空システムを対象としたものが代表的である。一方、車載システム分野では、実践応用に関する研究が十分に行われていない。車載システムは、大規模・複雑であることに加え、急激に発展したため、実践応用研究が追いついていないからである。

次世代車載システムはハイブリッドシステム、メニーコアシステム、知能化システムにより構成されると考えられる。車載システム開発では、MATLAB/Simulink と呼ばれるツールを使用することが主流である。この開発では、本質的に、離散と連続のハイブリッドシステムに基づいたモデルを構築し、ソースコードを自動生成する。このことをモデルベース開発(MBD)と呼ぶ。自動運転のような、より高度な制御を目指して、次世代のMBDについて検討が始まっている。また、自動運転に必要な計算能力を考慮すると、近未来、メニーコア CPU が使われることが想像できる。自動車業界の団体である AUTOSAR では、メニーコアを対象とした次世代プラットフォームについて検討が始まっている。さらに、自動運転における、画像処理や制御では、人工知能や機械学習を使用することが検討されている。軍事やエンタテインメント分野では、人工知能や機械学習は使われてきたが、自動車のような身近にある人命に直結した民生機器では、その信頼性と安全性の保証は必須である。これらのことから、本研究では、次世代車載システムにおいて、特に、ハイブリッドシステム、メニーコアシステム、知能化システムを対象とすることとし、これらが扱える形式手法を提案する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代車載システムの安全性と信頼性を保証できる形式手法を提案することである。本研究で想定している次世代車載システムは、(1)知能化システム、(2)ハイブリッドシステム、(3)メニーコアシステムにより構成されているものとする。制御アプリケーションがハイブリッドシステムとして MATLAB/Simulink で作成され、その入出力がニューラルネットワークなどを用いた知能化システムと連携し、それらはメニーコア上に実装されている。

3. 研究の方法

(1)では、知能化システムの安全性と信頼性を形式手法で保証する方法を提案する。知能化システムは不確定性を持つため、その検証に関しては未知なことが多く、研究の初期では、実験を実施し、問題点を明らかにする。次に、知能化システムを対象とした安全性・信頼性に関する形式仕様作成法を明らかにし、不確定性を取り扱うことができる形式仕様言語を提案する。そして、この形式仕様言語に基づいて知能化システムのテストを実施する方法、および、システムを直接的に形式検証する方法についても検討を行う。(2)では、大規模かつ複雑なハイブリッドシステムの安全性と信頼性を形式手法で保証する方法を明らかにする。本研究では、MATLAB/Simulink で開発される大規模なシステムを対象とする。MATLAB/Simulink では、微分方程式、非線形算術計算のような複雑な演算を使用でき、制御システム開発に適している一方、複雑な計算は、様々な問題の解決を決定不能にし、自動検証を困難にしている。自動化可能な部分問題も存在するが、計算コストが高く、大規模なシステムの検証を実用的な時間で実施することが難しい。そこで、本研究では、従来から研究されている記号実行などの静的な形式検証とモンテカルロ法や Markov Chain Monte Carlo 法などのシミュレーション手法を組み合わせ、規模と複雑さの問題を解決する方法を明らかにする。そして、提案手法を、MATLAB/Simulink ツールのプラグインツールとして実現する。(3)では、次世代車載システムを構成する知能化システムやハイブリッドシステムを動作単位とし、メニーコアシステム上での並行動作を検証する手法を提案する。メニーコアシステム上には基本ソフトウェアが実装されており、アプリケーションは、そのシステムサービスを用いて実装する。基本ソフトウェアは、処理のマイグレーションや負荷分散などの高度なスケジューリングメカニズムを持つ。よって、並行動作を正確に検証するためには、そのようなスケジューリングメカニズムを考慮しなければならない。そこで、本研究では、メニーコアシステム向けのスケジューリングメカニズムを考慮したモデル検査手法を提案する。車載システム向けの OS には、従来からの Classic AUTOSAR OS と Adaptive AUTOSAR OS がある。本研

究では、それらのメニーコア版を対象とする。

4. 研究成果

本研究課題の研究期間において研究を実施し、以下の成果を獲得することができた。

- (1) **Dataset Fault Tree Analysis 手法とそれを用いた機械学習システムの評価手法の提案.**
機械学習を用いて実現された分類器に焦点を当て、その安全性を系統的に評価する手法を提案した。分類器の評価では、期待する認識率など、特定の基準がある。この基準は、評価用データセットの内容によって異なると考えられる。例えば、訓練データセットと同等のものの場合、高い認識率が期待されるが、ノイズが多く入った悪状況を想定したデータセットでは、あまり高い認識率は期待できない。さらに、実運用において、それらの状況が生じる頻度にも違いがある。よって、実際に分類器を運用する状況を想定して、評価用データセットを分類して作成し、系統的に評価する必要がある。提案手法では、安全分析ではよく知られている FTA (Fault Tree Analysis) をデータセットの取り扱いができるように拡張し、データセットを分類する。分類したデータセットには、期待する認識率、その状況が発生する頻度を割り当てる。そして、これらの情報に基づいてテストを実施し、基準を満たすかどうか、統計的に評価する手法を提案した。提案手法は、CNN (Convolutional Neural Network) による手書き文字データセット、および、Audi Autonomous Driving Dataset を用いて評価し、その適用可能性、および、有効性を確認することができた。なお、本成果により、ソフトウェアテスト技術振興協会の第十二回善吾賞を受賞した。
- (2) **形式仕様記述言語 BBSL とそれを用いた画像認識システムのテスト手法の提案.** 従来の仕様記述の対象は原始的な値が中心であったが、自動運転では、画像や軌道などの複雑なデータが対象であり、それらを明確に表現する仕様記述法は確立していない。幾何学的に表現することも考えられるが、試行錯誤を行いにくく、仕様記述に適していないと考えられる。適切な観点や抽象表現を発見することがポイントとなる。画像認識では、Bounding Box がよく用いられるが、仕様記述の観点からは、Bounding Box は画像の抽象化と捉えることもできる。そこで、区間計算で定義されている区間を用いて Bounding Box を定義し、画像上の位置関係の仕様を厳密に記述する形式仕様記述言語 BBSL (Bounding Box Specification Language) を提案、定理証明システム Coq 上の処理系を実装し、GitHub で公開している。米国 National Highway Traffic Safety Administration が公開している自動運転システムのテスト手法に関する文書に基づいて、BBSL によるテストケースの記述実験を行った。その結果、代表的な状況を厳密に記述可能であることが確認できた。さらに、BBSL を用いた画像認識システムの仕様ベーステスト手法を提案した。BBSL では、与えられた Bounding Box に対して、どのような反応をすべきか規定されている。そこで、提案手法では、正解 Bounding Box の反応と認識された Bounding Box の反応を比較し、それらが一致していることをテストする。この手法と KITTI オープンデータセットを用いて、複数の画像認識システムのテストを実施した。その結果、安全性の観点から重要な誤認識を指摘できることがわかった。
- (3) **自動運転シナリオのモデル化手法およびシナリオ生成手法の提案.** 自動運転車を取り巻く状況は膨大であり、それらすべてに関してテストを事前に実施することは不可能である。そこで、対象範囲を絞り込み、シナリオに基づいてテストを実施することが一般的である。そのようなシナリオでは、自動車の位置関係や動作を表現するために、しばしば、アイコンなどを用いたグラフィカルな図が用いられる。しかしながら、そのような図は、非形式的であり、見るものによる理解の齟齬を生じやすく、高信頼システムの開発には適していない。そこで、シナリオ開発のためのグラフィカルな記法である車両位置関係図 (Vehicle Relation Diagram, VPRD) を提案した。統一された標準記法の提案を目的にしているため、VPRD の記法は、システム開発における標準記法である UML のアクティビティ図をベースにしている。また、VPRD を用いると、大量のシナリオを1つの図で簡潔に表現できる。そこで、VPRD を SAT ソルバにより取り扱い可能な形式に変換する手法を提案した。これにより、SAT ソルバを用いて、自動的にシナリオを探索、および、列挙することが可能になった。この手法を、SMT ソルバ z3 の Python へのバインディングである Z3Py を用いて実装し、GitHub で公開した。
- (4) **MATLAB/Simulink モデルのテスト・検証ツールの提案.** 車載システム開発では、MATLAB/Simulink と呼ばれるツールを用いて制御に関するモデルを構築し、ソースコードを自動生成することが、デファクト標準となっている。本研究では、そのようなモデルのテスト、および、検証を行う手法を提案し、それらの一部を商用ツールとしてリリースすることに成功した。以下に、提案した手法を示す。
 - (4-1) **大規模複雑 MATLAB/Simulink モデルのテンプレートに基づいたテスト手法の提案.**
MATLAB/Simulink モデルにおいてカバレッジ基準を満たすテストスイートを自動生成する手法を提案した。テストスイートを発見する標準的な手法は、条件分岐の制約充足を解析して、特定のパスを通る入力を見出すものである。しかしながら、MATLAB/Simulink モデルでは、非線形算術計算のような複雑な演算を使用できるため、一般には、自動的に制約充足を判定できない。そこで、Monte-Carlo 法を用いて MATLAB/Simulink モデルの探索を行い、カバレッジ基準を満たすテストスイート

を発見することにした。一方、MATLAB/Simulink モデルでは、時系列データを入力とした動作を記述しているため、時間に伴う入力の変化を取り扱う必要がある。そこで、入力の時系列データの変化パターンを一般化したテンプレートを用いて乱択を行うことにした。そして、実用規模の大規模複雑 MATLAB/Simulink モデルを対象として、従来の代表的なテストスイート生成ツールと比較してところ、性能が向上していることを確認できた。

(4-2) **大規模複雑 MATLAB/Simulink モデルの定数伝搬に基づいたテスト手法の提案。** (4-1) では、単純な Monte Carlo 法を用いているが、それでも、ある程度の範囲をカバーできることが確認できた。しかしながら、すべてのブロックを網羅するためには、モデルの内部的な構造を解析する必要がある。MATLAB/Simulink モデルには、非線形演算などの複雑な演算が含まれているため、直接的な解析は困難である。そこで、モデル中の定数に注目し、その伝搬を解析しテストする手法を提案した。これにより、テストの効率を大幅に向上させることができた。

(4-3) **SMT ソルバを利用した MATLAB/Simulink モデルの検証手法の提案。** (4-1) と (4-2) は、Monte Carlo ベースの手法であり、適切なテストスイートがあるにもかかわらず、それが見つかるとは限らない。前述のとおり、MATLAB/Simulink モデルでは、一般には、自動的に制約充足を判定できないが、特定のパスに関しては、決定可能な制約のみで構成される場合も少なくない。そこで、MATLAB/Simulink モデルを制約の形に変換する手法を提案した。獲得された制約は、テストスイートの発見、デッドロジックの発見、および、特定の性質が成立するかどうかの確認に使うことができる。しかしながら、モデルが大規模になると、計算量が大きく、現実的な時間で制約を解決することができなくなる。そこで、モデルの一部のみに注目する手法、および、分割する手法を提案した。これにより、多くの場合は、現実的な時間で解を求めることがわかった。

これらの手法のうち、(4-1) と (4-2) は、すでに、商用ツールに組み込まれている。(4-3) に関しては、ツールへの組込み方について検討中である。

(5) **メニーコア車載オペレーティングシステムの検証手法の提案。** 車載オペレーティングシステム (OS) の主な役割は、並行タスク、および、並行スレッドのスケジューリングである。OS が持つ状態に依存して、スケジューリングは変化するため、そのような OS のテストは複雑である。様々な実行列についてテストをしなければならないことに加えて、呼び出す API の組み合わせも膨大だからである。さらに、そのような膨大な実行列のそれぞれにおいて期待値を決める必要がある。そこで、提案手法では、OS の動作をモデルベーステストにより確認する。まず、OS の期待動作を表現する OS モデルを作成する。OS モデルは仕様記述言語 Promela を用いて作成し、それが正しいことをモデル検査ツール SPIN を用いて確認する。これにより、OS モデルの信頼性を十分に向上させる。次に、高信頼な OS モデルから、同じく、SPIN を用いて、網羅的なテストケースを生成する。生成されたテストケースは、実行可能なテストプログラムに変換して、OS の実装と組み合わせでテストを実施する。本手法を用いて、実際の商用 OS の検証を実施した。大量のテストプログラムを実行するため NICT の計算機クラスタ StarBED を利用して、並列にテストを実施した。その結果、妥当な時間での網羅的なテストに成功し、事前に従来手法によりテストされているのにもかかわらず、さらに 17 個の誤りを発見することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Thuy Nguyen, Takashi Tomita, Junpei Endo, Toshiaki Aoki	4. 巻 31(8)
2. 論文標題 Integrating Pattern Matching and Abstract Interpretation for Verifying Cautions Microcontrollers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Software: Testing, Verification and Reliability	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/stvr.1788	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 Hoang Viet Tran, Pham Ngoc Hung, Viet Ha Nguyen, Toshiaki Aoki	4. 巻 193
2. 論文標題 A framework for assume-guarantee regression verification of evolving software	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science of Computer Programming	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.scico.2020.10243	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 Zhengguo Yang, Toshiaki Aoki, Yasuo Tan	4. 巻 -
2. 論文標題 Multiple conformance to hybrid-automata-modelled requirements for detecting indoor temperature anomalies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Indoor and Built Environment	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/1420326X20941576	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 TRAN Nhat-Hoa, CHIBA Yuki, AOKI Toshiaki	4. 巻 E102.D
2. 論文標題 Model Checking in the Presence of Schedulers Using a Domain-Specific Language for Scheduling Policies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1280 ~ 1295
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2017EDP7391	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 Guo Xiaoyun, Aoki Toshiaki, Lin Hsin-Hung	4. 巻 161
2. 論文標題 Model checking of in-vehicle networking systems with CAN and FlexRay	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Systems and Software	6. 最初と最後の頁 110461 ~ 110461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jss.2019.110461	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 TOMITA Takashi, ISHII Daisuke, MURAKAMI Toru, TAKEUCHI Shigeki, AOKI Toshiaki	4. 巻 E103.A
2. 論文標題 Template-Based Monte-Carlo Test-Suite Generation for Large and Complex Simulink Models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences	6. 最初と最後の頁 451 ~ 461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transfun.2019MAP0010	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 青木 利晃	4. 巻 62
2. 論文標題 車載システム開発における形式手法実践の現状と課題	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 134 ~ 140
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.62.4_134	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 MALEEHUDAN Pattaravut, CHIBA Yuki, AOKI Toshiaki	4. 巻 E101.D
2. 論文標題 A Verification Framework for Assembly Programs Under Relaxed Memory Model Using SMT Solver	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 3038 ~ 3058
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transinf.2018EDP7099	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 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 17件）

1. 発表者名 Nhat-Hoa Tran, Toshiaki Aoki
2. 発表標題 SSpinJa: Facilitating Schedulers in Model Checking
3. 学会等名 21th IEEE International Conference on Software Quality, Reliability, and Security(QRS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Channon Pattiyanon, Toshiaki Aoki
2. 発表標題 Analysis and Enhancement of Self-sovereign Identity System Properties Compiling Standards and Regulations
3. 学会等名 8th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Channon Pattiyanon, Toshiaki Aoki, Daisuke Ishii
2. 発表標題 Analysis and Enhancement of Self-sovereign Identity System Properties Compiling Standards and Regulations
3. 学会等名 8th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jingcheng Yuan, Toshiaki Aoki, Xiaoyun Guo
2. 発表標題 Comprehensive Robustness Evaluation of File Systems with Model Checking
3. 学会等名 International Conference on Software Quality, Reliability, and Security (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kenji Fujita, Kunihiko Hiraishi, Toshiaki Aoki
2. 発表標題 Risk Assessment Using Coloured Petri Nets for Telemedicine
3. 学会等名 International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshiaki Aoki, Daisuke Kawakami, Nobuo Chida, Takashi Tomita
2. 発表標題 Fault Tree Analysis for Systematic Evaluation of Machine Learning Systems
3. 学会等名 IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中健人, 青木利晃, 川上大介, 千田伸男, 河井達治, 富田堯
2. 発表標題 自動運転システムにおける画像を対象とした形式仕様記述言語BBSLの提案
3. 学会等名 情報処理学会 第205回ソフトウェア工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木玄貴, 富田堯, 青木利晃, 河井達治, 川上大介, 千田伸男
2. 発表標題 自動運転システム開発におけるシミュレーション検証のためのテストケース作成手法の提案
3. 学会等名 情報処理学会 第207回ソフトウェア工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takashi Tomita, Daisuke Ishii, Toru Murakami, Shigeki Takeuchi, Toshiaki Aoki
2. 発表標題 A Scalable Monte-Carlo Test-Case Generation Tool for Large and Complex Simulink Models
3. 学会等名 11th Workshop on Modelling in Software Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Thu Trang Nguyen, Pattaravut Maleehuan, Toshiaki Aoki, Takashi Tomita, Iori Yamada
2. 発表標題 Reducing False Positives of Static Analysis for SEI CERT C Coding Standard
3. 学会等名 Joint International Workshop on Conducting Empirical Studies in Industry and 6th International Workshop on Software Engineering Research and Industrial Practice (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazunori Someya, Naoki Ishihama, Keiichi Wada, Toshiaki Aoki
2. 発表標題 Compaction of Spacecraft Operation Model using Domain Knowledge based Stereotype
3. 学会等名 International Symposium on Space Technology and Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nhat-Hoa Tran and Toshiaki Aoki
2. 発表標題 Conformance Testing of Schedulers for DSL-based Model Checking
3. 学会等名 26th International SPIN Symposium on Model Checking of Software (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Thu-Trang Nguyen, Toshiaki Aoki, Takashi Tomita and Iori Yamada
2. 発表標題 Multiple Program Analysis Techniques Enable Precise Check for SEI CERT C Coding Standard
3. 学会等名 Asia-Pacific Software Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Thuy Nguyen, Toshiaki Aoki, Takashi Tomita and Junpei Endo
2. 発表標題 Integrating Static Program Analysis Tools for Verifying Cautions of Microcontroller
3. 学会等名 Asia-Pacific Software Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshiaki Aoki
2. 発表標題 Model Checking Automotive Systems
3. 学会等名 Workshop on Testing, Analysis, and Verification of Cyber-Physical Systems and Internet of Things (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 太田十字光, 青木利晃
2. 発表標題 Event-Bに基づいた鉄道システムの実践的な形式化と検証
3. 学会等名 情報処理学会 第203回ソフトウェア工学研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nhat-Hoa Tran, Yuki Chiba and Toshiaki Aoki
2. 発表標題 Qualitative and Quantitative Analysis with Scheduling Policies in Model Checking
3. 学会等名 The 33rd ACM/SIGAPP Symposium On Applied Computing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Trinh Le Khanh, Yuki Chiba and Toshiaki Aoki
2. 発表標題 Formalization and Verification of AUTOSAR OS Standard's Memory Protection
3. 学会等名 The 12th International Symposium on Theoretical Aspects of Software Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zhengguo Yang, Toshiaki Aoki, Yasuo Tan
2. 発表標題 Multiple Conformance to Hybrid Automata for Checking Smart House Temperature Change
3. 学会等名 IEEE/ACM the 22nd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Zhengguo Yang, Toshiaki Aoki, Yasuo Tan
2. 発表標題 Modeling the Required Indoor Temperature Change by Hybrid Automata for Detecting Thermal Problems
3. 学会等名 The 23rd IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木利晃, 川上大介, 千田伸男, 富田亮
2. 発表標題 確率統計に基づいた故障木とテストによる機械学習システムの系統的評価手法
3. 学会等名 ソフトウェアエンジニアリングシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木利晃
2. 発表標題 形式手法と安全性
3. 学会等名 安全工学会 安全工学研究発表会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青木利晃
2. 発表標題 車載システム開発における形式手法実践の現状と課題
3. 学会等名 日本ソフトウェア科学会 第16回 ディペンダブルシステムワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

本研究の成果により, ソフトウェアテスト技術振興協会 第十二回善吾賞を受賞した。

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	石井 大輔 (Ishii Daisuke) (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 (13302)	

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