

令和 2 年 7 月 8 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00100

研究課題名(和文) CPSのためのモデル検査・実行テスト統合試験環境の構築

研究課題名(英文) Hybrid Testing Environment of Execution Testing and Model Checking for CPS

研究代表者

久代 紀之(Kushiro, Noriyuki)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・教授

研究者番号：50630886

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：Cyber Physical System・IoTなど大規模システムのシステムテストのテストケース設計・実行の効率化・高信頼化を実現するため、本研究では、以下の2つの項目を開発した。(1)自然言語で記載されたシステム仕様書から、システムテストケースを自動生成するアルゴリズム・ツールの開発、(2)自動生成されたテストケースを、実際の機器や機器に搭載するソフトウェアを対象として、決定的/非決定的順序で自動実行、自動評価ができる統合評価環境の開発
これら開発した2つのツール・評価環境を日本を代表するIoTシステム開発企業2社のテスト設計・製品評価に適用し、評価結果を反映することで実用性を高めた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

IoTシステムなど我々の生活に密着した大規模なシステム開発において、その信頼性を確保するためのシステムテストに膨大な工数が必要となっていた。また、これらシステムにおいては、種々の機器がネットワークを介し、同時並行的に動作するため、様々なタイミングを想定したテストが必要だが、従来の人手による方法では実行不可能なことも多かった。本研究では、システム仕様書から必要となるテストケースを自動生成するとともに、生成されたテストケースを種々のタイミングで自動実行・評価することができるツール・環境を開発した。これら開発により、システムテストの設計・実行を効率化し、信頼性高いシステムの実現を可能とした。

研究成果の概要(英文)：For improving efficiency and quality of system test for large scale system, e.g., IoT system and Cyber Physical System (CPS), the following two items were developed in the study: the algorithms and tools, which generate test cases automatically from a system specification document described in natural language with natural language processing technology, and a hybrid testing environment, which validates actual products and/or software on deterministic and non-deterministic orders with the model checking technique.
The tools and test environment were applied to test processes in the two major manufacturers in Japan. The practicalities of the tools and the environment were improved by reflecting the results of the estimation.

研究分野：ソフトウェア工学

キーワード：テストケース自動生成 テスト自動実行・評価 モデル検査・実行テストの融合 仕様書論理構造の可視化 機能・品質テスト 決定・非決定的テスト ホワイト・ブラックボックステスト レビュー支援

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、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

Cyber Physical System (CPS) と呼ばれる大規模かつ広域の制御システムにおいて、マルチベンダーでのシステム開発やオープンプラットフォームを活用した機器開発が一般化している。CPS は、社会、人、機械と協調するシステムであり、高い信頼性が要求される。このため、これらシステム・機器開発では、機能や機器を追加するたびに、膨大な評価が必要とされ、その開発工数を増大させていた。一方で、これらシステム、機器開発には、下記に示す非決定的要素を含むため、回帰テストを含めた膨大な評価を実施したとしても、必ずしも十分な信頼性を得ることができないという課題があった。

- ① 複数機器が、同時に動作するため、機器間のメッセージ交換順序が実行の都度、変化する。
- ② 複数機器が共通の機器に同時にアクセスする場合には、設計段階では、どの機器が共通機器の資源を獲得するかを決定することができず、実行時に初めて決定される。
- ③ 機器単体においても、処理時間や実行過程が設計時に決定できず、機器として統合時に、初めて決定される。CPU やメモリ等の資源の占有関係も、実行時に非決定的に決定される。

これら、非決定的な要素を含むシステムや機器の評価手法として、形式的検証やモデル検査技術が注目されている。しかし、モデル検査技術を導入するためには、実機を用いた実行テスト（システム試験、組合せ試験など）に用いるものとは別にモデル検査のための新たな試験ケースをモデル検査用の専用言語にて記述する必要がある。さらに、その評価結果も、論理記述されたテスト要件が、試験ケース上で成立しうかどうか出力されるのみであり、具体的な不具合の改修に必要な情報が十分に得られないという課題があった。これら、モデル検査技術導入のための試験ケース作成負荷および評価結果の解釈、利用の困難さから、広く実務に利用するには至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、以下の2つの開発により、今後、急速に普及が予測される CPS に代表される大規模・広域監視制御システムの開発効率化と信頼性の高いシステムの実現に寄与することを目標とする。

- ① モデル検査技術を適用することで非決定的手順を含む試験ケースを評価可能とするとともに、モデル検査記述言語で記載された試験ケースを用い、実機上あるいはエミュレータ上で動作を直接確認できるようにする
- ② 機能、機器追加のたびに要求される膨大な回帰テストを効率化するための試験自動化（試験自動実行、自動評価）、市場における重大な不具合事例を実行可能な試験ケースとして蓄積し再現できる統合評価環境の構築を行う

3. 研究の方法

研究目的を達成するために必要となる要素技術開発とともに、共同研究企業の協力の下、実システム開発への適用による有用性評価を行い、評価結果をフィードバックすることで統合評価環境の実用化を進める。

4. 研究成果

CPS・IoT など大規模システムのシステムテストのテストケース設計・実行の効率化・高信頼化の実現のため下記2つの要素技術を開発

- ① モデル検査器を用いた統合評価環境の開発
- ② 統合評価環境で動作するテストプログラム自動生成機能の開発

さらに、これら開発したツール・評価環境を、日本を代表する IoT システム開発企業 2 社のテスト設計・製品評価に適用し有用性を評価した。以下に、各開発の概要を項目毎に説明する。

4.1 モデル検査器を用いた統合評価環境の開発

下記要素技術開発によりブラックボックス・ホワイトボックスの両試験に対応可能な評価環境を実現した。

- ① 同一のテストケースから、非決定・決定的なテスト手順による実行テストを可能なモデル検査器の実現（非決定・決定テストの実現）
- ② モデル検査器と実機器間のメッセージ交換を実現するゲートウェイの開発（ブラックボックス試験の実現）
- ③ モデル検査器と実機ソフトウェア間の実時間でのイベント交換を実現するソフトウェアエミュレータの開発（ホワイトボックス試験用）

さらに、

- ④ 試験ケースの資産性を向上するため、機能と試験対象システム構成を独立して記述可能とし、種々のシステム構成に対し動的に試験ケースを生成する試験ケース記述言語の開発
- ⑤ 機器構成とテスト手順から実行可能なテストケースを自動生成する機能
- ⑥ 試験自動化のため、検査式を LTL 式にて記載し自動評価する機能
- ⑦ LTL 式を用い、膨大な動作ログから試験ケースを抽出する機能

これら実現により、決定・非決定、ホワイト・ブラックボックス、実行テスト・モデル検査による試験を、対象機器の特性、適用する試験フェーズに合わせ自在に選択可能な統合評価環境を実現した（図1）。

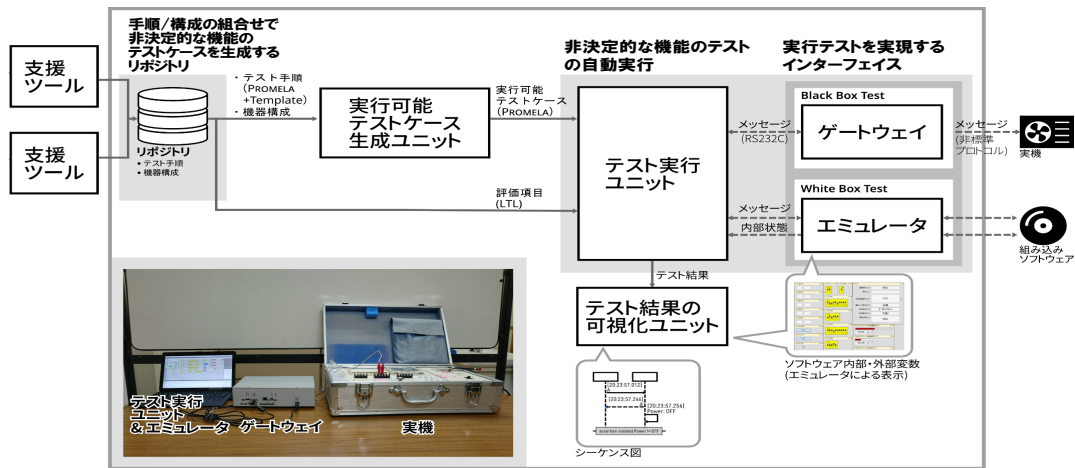


図1 統合評価環境

4.2 統合評価環境で動作するテストプログラム自動生成機能の開発

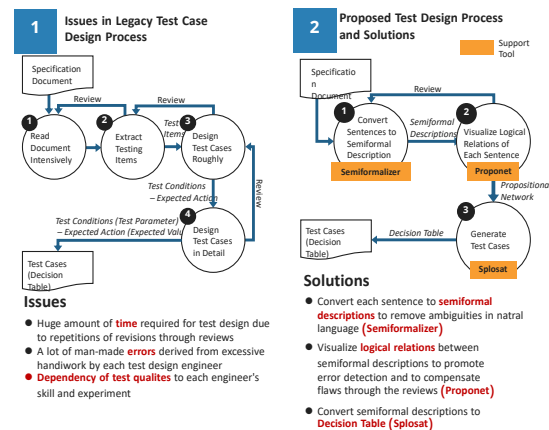
統合評価環境で動作するテストプログラムの作成を容易化するため、テストケース設計、統合評価環境上で実行可能なテストプログラムの生成を支援する以下のツールを開発した。CPS や IoT システムにおいては、自然言語記載された仕様書からのテストケース(主に機能試験ケース)、製品ドメイン固有の試験(主に品質試験ケース)、過去の不具合事例の再現試験(ISO9000 にて定められた試験ケース)を実行する必要があり、これらの3入力からのテストケース設計・実行可能なテストプログラムの生成を支援するツール群を整備した。これらの結果、統合評価環境用試験プログラム言語知識を有さないエンジニアにもテストプログラムの生成が容易にできるようになった。

また、これらツールを、協力会社製品に適用し、その有用性を評価した(図2)。

- ① 自然言語で記載されたシステム仕様書から、統合評価試験環境上で動作可能な機能・非機能試験ケースを自動生成するプロセス・ツール群を開発した。これにより、記載が難しいとされる非決定要素を含む試験ケースの記述を容易化した。本ツールを協力会社(2社)の9事例に適用し、ツールを精緻化した。
- ② 実際の仕様書では、表形式の記載が多用される。表形式記載された仕様書にも対応可能なようにツールを拡張した。さらに、自動生成ツールの変換性能向上のため、6種類の仕様書から、仕様書特有の表現を集めたデータベースを構築し仕様書特有表現対応変換ルールを抽出した。左記変換ルールを試験ケース自動生成ツールに搭載し、70%~90%の仕様書表現(文・表形式)が、正しく変換できることを確認した。また、日本語以外の他言語(英語)に対応可能とした。
- ③ 動作仕様書から生成した機能試験に加え、製品ドメイン要求に基づき実施する品質試験ケースの生成を支援するため、協力会社での品質試験ケースの事例調査を実施し、品質試験事例をパターン化した。パターン記述に、機能試験ケース記述言語と同じものを適用することで、機能・品質試験を融合した試験ケースを自動生成するツールを実現した。
- ④ 実際の仕様書には、記述の漏れや曖昧さが含まれる。これら記述の漏れや曖昧さの修正のためのレビューを支援するため、仕様書記述の論理構造を可視化する機能を実現した。

Test Case Generation Algorithms and Tools for Specifications in Natural Language

Kyushu Institute of Technology
Yusuke Aoyama, Takeru Kuroiwa, and Noriyuki Kushiro



3 Converting Sentences to Semiformal Descriptions

Natural Language Specification:
When clicks B icon, the word processor makes text bold.

Semiformal Specification:
click(B, icon) → make(the_word_processor, text, bold).

4 Visualizing Logical Relations among Semiformal Descriptions

5 Converting Semiformal Descriptions to Decision Table

Type	Atomic Proposition	Test Cases
		1 2 3 4
condition	click(user, B_icon)	F T T F
condition	push(user, Ctrl+B)	T - F F
action	make(the_word_processor, text, bold)	T T - -

Examples[1]

When the reading is within the safe zone, then insulin is only delivered if the level of sugar is rising and the rate of increase of sugar level is increasing [1].

Semiformalizer

is(the_reading_within_the_safe_zone) & is(the_level_of_sugar_rising) & is(the_rate_of_increase_of_sugar_level_increasing) → deliver(insulin)

Proponer

the reading is within the safe zone
the level of sugar is rising
the rate of increase of sugar level is increasing

Splotat

Type	Atomic Proposition	Test Cases
		1 2 3 4
condition	is(the_reading_within_the_safe_zone)	T F T T
condition	is(the_level_of_sugar_rising)	T - F T
condition	is(the_rate_of_increase_of_sugar_level_increasing)	T - - F
action	deliver(the_system.insulin)	T - - -

図2 自然言語で記載した仕様書からのテストケース(ディジションテーブル)の自動生成ツール

4.3 実証試験

① 非決定的・決定的試験の自動実行と自動評価機能の実証

試験自動実行・試験結果の自動評価の実行環境の構築:テスト対象機器のプロセッサのエミュレータと統合評価環境の実行エンジンとのインタフェースを開発し、ソフトウェアブラックボックス試験に対応できるよう拡張した。この結果、協力会社における従前のシステム評価では、再現が難しいとされていた3つの事例を、本統合評価環境上にて再現できることを確認した。

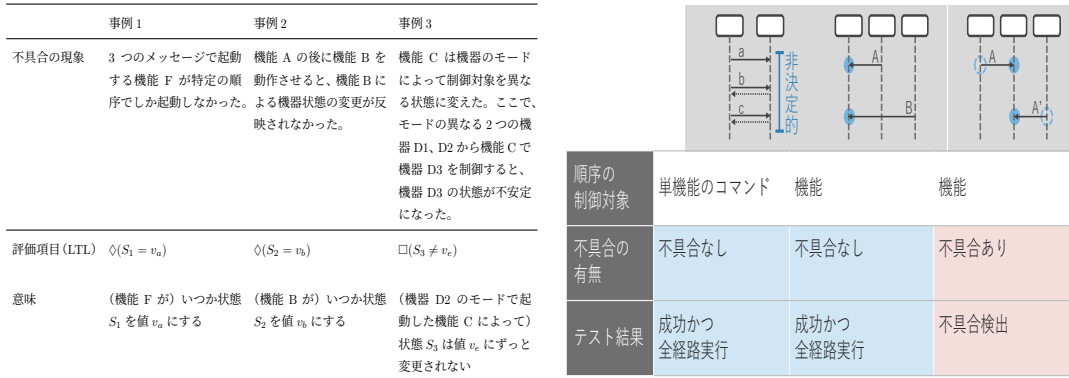


図3 統合評価環境による自動試験実行・自動評価の実証試験結果
(左:試験ケース、右:実行環境による実行結果)

② 統合評価環境の実システムへの適用評価

統合評価環境を用いて、共同研究先企業のシステム評価に適用し、従前実施していたシステム試験の大半(85%)が、統合試験環境の自動評価により代替できること、さらに従前に比較して、40~50%の実施時間の短縮ができることを確認した。さらに、テストケースの資産化により、1年以内に統合環境へのテスト環境の移行工数(テスト手順、テスト構成等のリポジトリの整備等の工数)が回収できることを確認した。

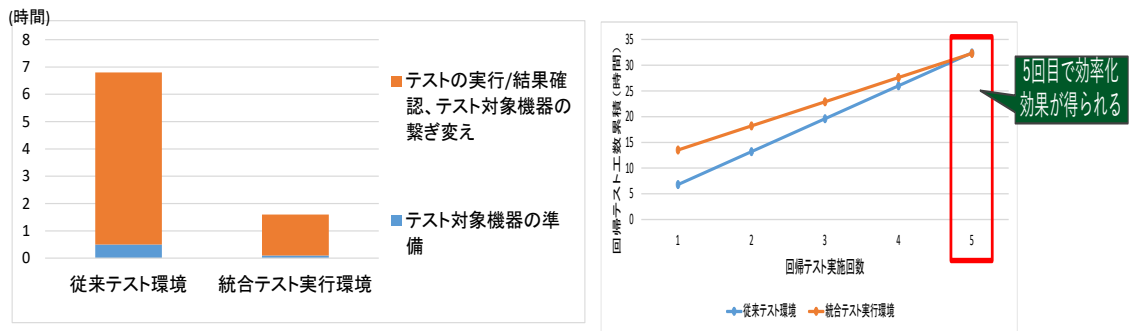
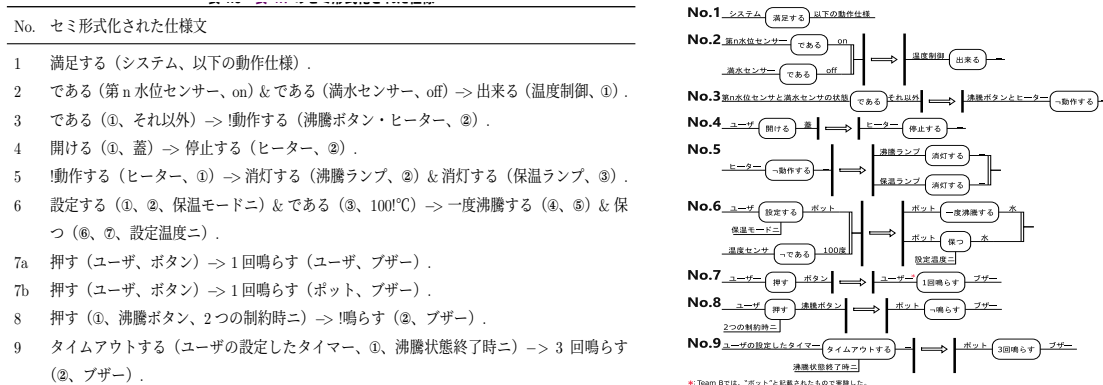


図4 統合評価環境の実システム適用評価

(左:統合評価環境適用時のテスト実行効率の改善、右:テスト環境移行工数を踏まえた回収見込み)

③ 自然言語仕様書からのテストケース・テストプログラムに自動生成評価

協力会社2社の技術者13名を対象に、本研究で開発した自然言語仕様書からのテストケース生成・論理構造可視化のツールを用いて、システム仕様書からテストケース生成(ディジションテーブル)を行うワークショップを実施し、自然言語仕様書から70~82%程度の Precision Recall でテストケースの生成の自動化が可能で、論理構造可視化ツールから、元仕様書に含まれた論理的な誤り、曖昧性を除去できることを確認した。



Note: 記述漏れの候補を参照の便宜のために丸数字で置き換えた。実験参加者には丸数字の代わりに“??”と書かれた仕様文についてレビューを実施させた。

図5 自然言語仕様書からのテストケース・テストプログラム自動生成評価結果
(左:ツールによる自然言語仕様の形式化、右:仕様書論理構造の可視化結果)

- ④ 協力会社 1 社と 1 年間の製品適用プロジェクト:
 技術者(7 名)とのワークショップ形式で、実際の製品仕様書からの試験ケースの自動生成、実際の製品を用いた統合評価環境での自動実行・評価、ツールによる可視化結果を用いた試験結果レビュー等実施し、開発した 2 つのツールの実用性および評価試験効率の改善を確認した。

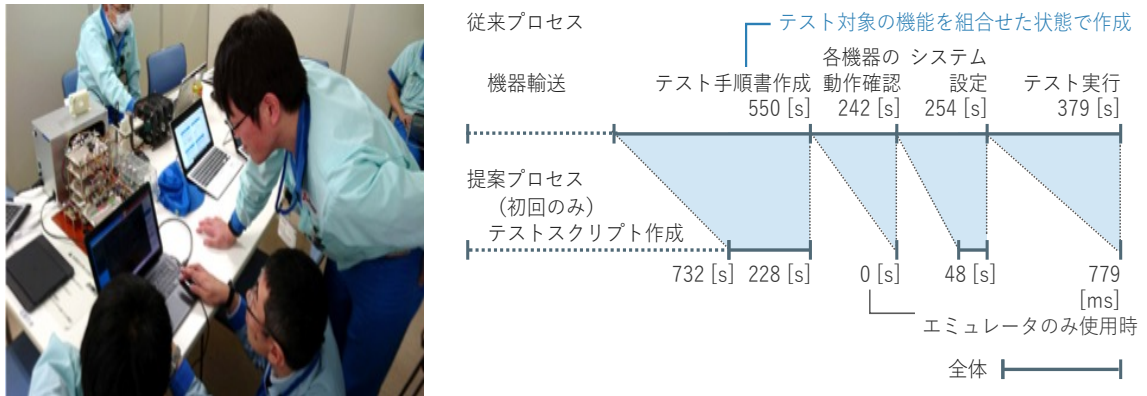


図6 本評価環境の一連のシステム評価プロセスへの適用実証
 (左:ツール適用による評価の様子、右:評価効率の改善)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takeru Kuroiwa, Yusuke Aoyama, Noriyuki Kushiro	4. 巻 1
2. 論文標題 A Hybrid Testing Environment between Execution Test and Model Checking for IoT System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of International Conference on Consumer Electronics	6. 最初と最後の頁 1,2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICCE.2019.8661998	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 Yusuke Aoyama, Takeru Kuroiwa and Noriyuki Kushiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Environment of Execution Testing and Model Checking for Product Line Approach	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 25th Asia-Pacific Software Engineering Conference	6. 最初と最後の頁 1,2
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 青山 裕介、黒岩 丈瑠、久代 紀之	4. 巻 J101-D
2. 論文標題 モデル検査の実行順序制約の図式表現と試験ケースの自動生成	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌D 情報・システム	6. 最初と最後の頁 502～511
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） DOI:10.14923/transinfj.2017PDP0010	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 Takeru Kuroiwa, Yusuke Aoyama and Noriyuki Kushiro	4. 巻 96
2. 論文標題 Testing environment for CPS by cooperating model checking with execution testing	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Procedia Computer Science	6. 最初と最後の頁 1341, 1350
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.procs.2016.08.179	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 青山裕介、黒岩丈瑠、久代紀之	4. 巻 61
2. 論文標題 テストケース生成のためのシステム仕様書の論理記述変換アルゴリズム	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 521-534
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 黒岩丈瑠、青山裕介、久代紀之	4. 巻 140
2. 論文標題 エミュレーション技術の活用によるIoTシステムのテスト効率化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌	6. 最初と最後の頁 113-121
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.140.113	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 Takeru Kuroiwa, Yusuke Aoyama, Noriyuki Kushiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Testing Environment for Virtual Network Embedded System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)	6. 最初と最後の頁 1-3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICCE46568.2020.9043099	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 Yusuke Aoyama, Takeru Kuroiwa, Noriyuki Kushiro	4. 巻 1
2. 論文標題 Test Case Generation Algorithm and Tools for Specifications in Natural Language	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ICCE46568.2020.9043022	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 Noriyuki Kushiro, Koshiro Nishinaga, Yusuke Aoyama, Toshihiro Mega	4. 巻 159
2. 論文標題 Difference of Risk Knowledge described in work procedure manual and that used in real field by field overseers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Procedia Computer Science	6. 最初と最後の頁 1928-1937
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.procs.2019.09.365	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11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 村上響一、青山裕介、村上神龍、久代紀之
2. 発表標題 自然言語で記載された仕様書からのテストケース自動生成アルゴリズムの構築
3. 学会等名 情報処理学会研究報告ソフトウェア工学
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上神龍、村上響一、青山裕介、久代紀之
2. 発表標題 自然言語で記載された仕様書からのテストケース生成支援
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久代紀之、青山裕介、村上響一
2. 発表標題 自然言語仕様書からのテストケース設計プロセスの定義とプロセスを支援する支援ツールの開発
3. 学会等名 情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青山裕介、黒岩丈瑠、久代紀之
2. 発表標題 順序入れ替えテストケースの蓄積を実現するテスト環境
3. 学会等名 人工知能学会全国大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上響一、青山裕介、村上神龍、久代紀之、牧茂、田畑一政、神代勉、中村潤
2. 発表標題 自然言語仕様書からの試験ケース生成のための条件・動作文の同定手法
3. 学会等名 情報処理学会研究会(2018年3月)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 十川雄司、青山裕介、黒岩丈瑠、久代紀之
2. 発表標題 LTL式による動作ログからの不具合要因特定支援ツールの構築
3. 学会等名 情報処理学会/ソフトウェア工学研究会 ウィンターワークショップ2018(2018年1月)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青山祐介、黒岩丈瑠、久代紀之
2. 発表標題 自然言語仕様からの機能間の並列・順序動作の抽出と左記テスト環境
3. 学会等名 情報処理学会 情報科学技術フォーラム(FIT2017)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久代紀之、青山祐介、江平達哉、新庄篤尚
2. 発表標題 アイデア会議のコミュニケーション可視化システムとノーインタフェース家電コンセプト構築への適用
3. 学会等名 情報処理学会 知能システム研究会(2018年3月)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 青山祐介、黒岩丈瑠、久代紀之
2. 発表標題 CPSのためのモデル検査・実行テスト統合環境の構築 - モデル検査器を用いた試験ケースの資産化
3. 学会等名 情報処理学会 第16回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 吉井亮介、村上神龍、青山裕介、久代紀之
2. 発表標題 テストケース設計のための自然言語仕様の状態遷移図表示による仕様の記述漏れ修正支援
3. 学会等名 電子情報通信学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青山裕介、黒岩丈瑠、久代紀之
2. 発表標題 テストケース自動生成のための自然言語の形式変換アルゴリズム
3. 学会等名 情報処理学会 FIT2019
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----