

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03204

研究課題名（和文）確率的グラフィカルモデルの形式検証とその人工知能への応用

研究課題名（英文）Formal verification of probabilistic graphical models and its application to artificial intelligence

研究代表者

Affeldt Reynald (Affeldt, Reynald)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員

研究者番号：40415641

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 7,370,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、確率とグラフを形式的に扱うように理論とツールを開発し、その応用実験も行った。定理証明支援系Coqを用いて、確率論及びより一般的なルベグ積分の形式化を行った。木構造とグラフ構造に関する理論を開発し、そのデータ構造に基づくアルゴリズムの形式検証に応用した。以上の形式化を用いて、情報理論と人工知能の基礎の形式化に取り組んだ。確率的プログラムの形式検証のため、理論を開発し、定理証明支援系Coqを用いて確率を含むエフェクトを有するプログラムの形式検証基盤を開発した。本研究の成果の普及活動として、オープンソースソフトウェアを公開した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

形式検証は一般的には基礎的な研究と見なされる。伝統的な数学分野の定理に対する形式検証実験のほうが注目を集めているからである。一方、IT製品の安全性評価に重要な、産業応用にも不可欠な技術である。例えば自動車のように、人命にかかわるシステムに人工知能を搭載するためには、その品質保証の技術が欠かせない。しかし、研究者の注目が薄い分野となっている。本研究では、確率的プログラミングでは初めて、正しさが証明されたソフトウェア実装とその形式化に必要な数学ライブラリが得られる。よって、人工知能の安全性・機械学習の形式検証・信頼性を保証するための基盤技術になりうる。

研究成果の概要（英文）：In this project we develop several formal tools to deal formally with probability and graphs. We provide a formalization of probability theory and more generally of Lebesgue integration in the Coq proof assistant. We develop theories to reason about tree and graph structures and apply them to the formal verification of programs. We applied the resulting theories to the formalization of the bases of information theory and artificial intelligence. We also develop theories to verify probabilistic programs and provide a generic and extensible framework to verify effectful programs in the Coq proof assistant. Most of our results are available as open access papers and open source software.

研究分野：形式手法

キーワード：形式検証 Coq 条件付き独立 情報理論 graphoid 確率プログラミング モナド

1. 研究開始当初の背景

IT 機器の安全性を厳密に保証する手法として、コンピュータ上での形式検証が注目されている。例えば、ISO/IEC 15408 (コモンクライテリア) 共通基準における最高の品質レベル (EAL レベル 7) では、形式手法によりソフトウェアの設計の正しさを厳密に証明し、論理的に矛盾の無い形で安全性を説明できることが必須とされている。一方で、自動運転やロボットなど次世代の先端応用分野においては、人工知能などの先進の技術が用いられている。しかし、その動作は確率論など高度で複雑な数学的基盤に依存しており、安全性の確認が極めて難しい。複雑な数学的性質を利用したソフトウェアの検証のためには、まずそこで使われる数学的基盤をコンピュータ上で形式化する必要がある。

2. 研究の目的

確率に基づくプログラムは人工知能、符号理論など、さまざまな分野で応用されている。しかし、そのプログラムの実装は複雑で正しさの証明が難しい。本プロジェクトの目的は、人工知能ソフトウェアの厳密な品質評価ができるように、確率に基づくプログラムの再利用可能な数学的基盤を形式化する。特に確率伝搬法で用いる確率的グラフィカルモデルについて、その形式定義や補題のライブラリ化を中心に取り組む。将来、本研究で構築した形式基盤はセンサーや通信データの厳密な解析に応用できると期待される。

3. 研究の方法

本研究では確率論やグラフやプログラムなどの正しさの保証は定理証明支援系 Coq を用いて得るようにする。数学理論は、Mathematical Components という標準ライブラリの拡張によって、再利用可能な形式ライブラリとして集約する。そのライブラリを用いて、プログラム検証基盤を開発する。ただし、プログラム検証の基本的な概念は関数型プログラム及びモナドとする。それぞれのライブラリと検証基盤を用いて、確認実験を行い、検証実験に関する報告を学会などで発表する。

4. 研究成果

a. 確率論の形式化

本研究の1つ目の成果は定理証明支援系 Coq を用いた確率論の形式化である。既存の研究の拡張として、新たな形式的定義や補題などを開発し、ライブラリとして提供した。その拡張は確率論に関する形式的リーゾニングに欠かせない基本的な性質を含む：グラフアンサンブル、包除原理 (トゥールーズ情報学研究所の Erik Martin-Dorel 氏の貢献に基づいて) など。特に、条件付き確率と条件付き独立を形式化が成功した [雑誌論文: Affeldt, Garrigue, Saikawa, PPL2019, Computer Software]。ただし、上記の確率論は有限確率分布に限る。一般化のために、測度論と積分法とそれに必要な実解析も形式化した (フランス国立情報学自動制御研究所などと共同研究) [雑誌論文: Affeldt, Cohen, Kerjean, Mahboubi, Rouhling, Sakaguchi, IJCAR2020; 学会発表: Affeldt, Cohen, Coq Workshop 2021, PPL2021, PPL2022]。

b. 情報理論の形式化

本研究の2つ目の成果は定理証明支援系 Coq を用いた情報理論の基礎の形式化である。具体的に、情報理論に関する標準教科書 Elements of Information Theory の最初の章の形式化を行った。その形式化はエンセンの不等式、クラフトの不等式などの圧縮に関する性質を含む。また、エントロピー、相互情報量などに関する性質を徹底的に形式化できた。特に、条件付きエントロピーの性質の形式化は上記の確率の形式化の応用となる。また、エントロピーと相互情報量の凸性の形式化のため、凸関数に関する論理を形式化した [雑誌論文: Affeldt, Garrigue, Saikawa, PPL2019, Computer Software]。凸性の応用を広げるため、圏論による抽象に従って、convex space/conical space の形式化も行った [雑誌論文: Affeldt, Garrigue, Saikawa, CICM2020]。

c. グラフ構造などの形式化

本研究の3つ目の成果はグラフ構造に関する形式的リーゾニングの開発である。グラフはプログラムの基本的なデータ構造であり、様々な場面で活用されている。例えば、木構造は最も基

本的なグラフ構造であり、ビッグデータで使われている簡潔データ構造の基礎である。本研究の際、簡潔データ構造に関するアルゴリズムの形式検証実験を行った。その実験は、静的ビット列を表すための LOUDS (Level-Order Unary Degree Sequence) と動的ビット列を表すための平衡二分探索木を含む[雑誌論文: Affeldt, Garrigue, Qi, Tanaka, ITP2019]。また、グラフは確率伝搬法の基本的なデータ構造でもある。符号理論では、確率伝搬法はタナーグラフというグラフィカルモデルで実現されている。本研究では、タナーグラフと確率伝搬法の形式化が成功し、その形式化を用いて、検証済みの復号アルゴリズムから実行可能なプログラムの生成も成功した[雑誌論文: Affeldt, Garrigue, Saikawa, Journal of Automated Reasoning]。

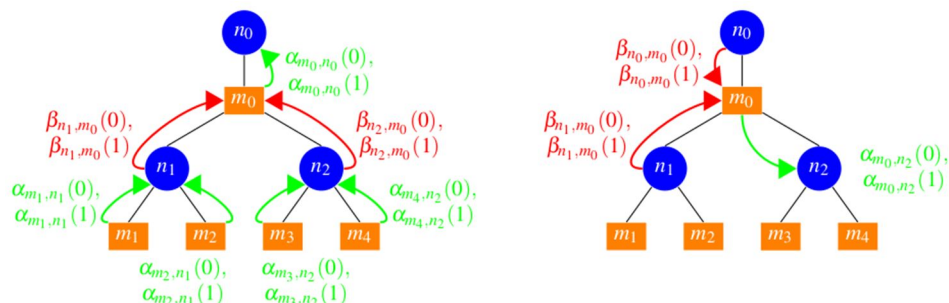


Figure 1: 検証した確率伝搬法アルゴリズムの基本的な操作

グラフは人工知能の基本的なデータ構造でもある。本研究では、上記の条件付き確率の形式化を用いて(上記文章参照)人工知能の基礎である graphoid axioms の形式化が成功した[雑誌論文: Affeldt, Garrigue, Saikawa, PPL2019, Computer Software]。また、人工知能で広く使われているベイジアンネットワークは条件付き確率変数のグラフとして表現されている。本研究では、ベイジアンネットワークによる確率の因子分解の定理を形式化するために、ベイジアンネットワークの形式化に着手した。確率変数のベクトルについて条件付独立を表現する必要があったため、新たに確率変数ベクトルおよび確率変数の同値性を定義し、確率変数ベクトルで定義された条件付独立と従来の個別の確率変数で定義された条件付独立との同値性を証明した。最後に、グラフに関する形式化実験として、量子回路のゲートを線形変換として表現し、モジュラーな形式化を与えた。ある回路をより多くの量子ビットを含む回路に配置するために、フォーカスという操作により作用する量子ビットを増やせるようにした。フォーカスの働きを指定するレンズも代数的な性質を持ち、回路の合成が柔軟になる。なお、ここでいう量子回路はゲートをノードとするグラフであり、その意味論は確率分布上の関数として与えられる[学会発表: 才川, PPL2022]。

```

Definition bit_flip_enc : endo 3 :=
  tsapp [lens 0; 2] cnot \v tsapp [lens 0; 1] cnot.
Definition bit_flip_dec : endo 3 :=
  tsapp [lens 1; 2; 0] toffoli \v bit_flip_enc.

Definition sign_flip_dec := bit_flip_dec \v hadamard3.
Definition sign_flip_enc := hadamard3 \v bit_flip_enc.

Definition shor_enc : endo 9 :=
  focus [lens 0; 1; 2] bit_flip_enc \v
  focus [lens 3; 4; 5] bit_flip_enc \v
  focus [lens 6; 7; 8] bit_flip_enc \v
  focus [lens 0; 3; 6] sign_flip_enc.
Definition shor_dec : endo 9 :=
  focus [lens 0; 3; 6] sign_flip_dec \v
  focus [lens 0; 1; 2] bit_flip_dec \v
  focus [lens 3; 4; 5] bit_flip_dec \v
  focus [lens 6; 7; 8] bit_flip_dec.

Definition shor_code (chan : endo 9) :=
  shor_dec \v chan \v shor_enc.

```

Figure 2: 線形変換で表現した Shor の 9 量子ビット符号

また、一般のグラフではなく木構造に特化した計算モデルとして、複雑でありながら効率的なストリーム型変換クラスを形式的に表現し、等価性の決定可能性が知られている最大の木構造変換クラスである下降型木変換モデルとの同値性を示すことに成功した [雑誌論文: Takahashi, Nakano, Asada, Theoretical Computer Science]。

d. モナドによるプログラムの形式検証

本研究の 4 つ目の成果はモナドを用いたプログラムの形式検証と確率的プログラムへの応用である。モナドを用いて関数型プログラミング言語でエフェクトを表すことができるだけでなく、

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計17件（うち査読付論文 17件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Affeldt Reynald, Cohen Cyril, Kerjean Marie, Mahboubi Assia, Rouhling Damien, Sakaguchi Kazuhiko	4. 巻 12167
2. 論文標題 Competing Inheritance Paths in Dependent Type Theory: A Case Study in Functional Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 10th International Joint Conference on Automated Reasoning (IJCAR 2020), Paris, France, June 29--July 6, 2020, Lecture Notes in Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 3~20
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-51054-1_1	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 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, Takafumi Saikawa	4. 巻 37(3)
2. 論文標題 Reasoning with Conditional Probabilities and Joint Distributions in Coq	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computer Software	6. 最初と最後の頁 79~95
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11309/jssst.37.3_79	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 Affeldt Reynald, Garrigue Jacques, Saikawa Takafumi	4. 巻 12236
2. 論文標題 Formal Adventures in Convex and Conical Spaces	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 13th Conference on Intelligent Computer Mathematics (CICM 2020), Bertinoro, Forli, Italy, July 26--31, 2020, Lecture Notes in Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 23~38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-53518-6_2	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 AFFELDT REYNALD, GARRIGUE JACQUES, NOWAK DAVID, SAIKAWA TAKAFUMI	4. 巻 31
2. 論文標題 A trustful monad for axiomatic reasoning with probability and nondeterminism	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Functional Programming	6. 最初と最後の頁 E17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S0956796821000137	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 Reynald Affeldt, David Nowak	4. 巻 188
2. 論文標題 Extending equational monadic reasoning with monad transformers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 26th International Conference on Types for Proofs and Programs (TYPES 2020), Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs)	6. 最初と最後の頁 2:1--2:21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.TYPES.2020.2	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 Ayumu Saito, Reynald Affeldt	4. 巻 -
2. 論文標題 Practical Aspects of Monadic Equational Reasoning in Coq	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 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 (PPL 2022)	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) 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 佐藤 哲也, 勝股 審也	4. 巻 -
2. 論文標題 関係プログラム論理のためのモナド上のダイバージェンス	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 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 (PPL 2022)	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) 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 Reynald Affeldt, Cyril Cohen	4. 巻 -
2. 論文標題 Formalization of the Lebesgue measure in MathComp-Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Coq Workshop 2021, July 2, 2021, Jul 2021	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) 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 該当する

1. 著者名 Reynald Affeldt, Xavier Allamigeon, Yves Bertot, Quentin Canu, Cyril Cohen, Pierre Roux, Kazuhiko Sakaguchi, Enrico Tassi, Laurent They, Anton Trunov	4. 巻 -
2. 論文標題 Porting the Mathematical Components library to Hierarchy Builder	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Coq Workshop 2021, July 2, 2021, Jul 2021	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) 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 該当する

1. 著者名 Yuta Takahashi, Kazuyuki Asada, Keisuke Nakano	4. 巻 11601
2. 論文標題 Streaming Ranked-Tree-to-String Transducers	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 24th International Conference on Implementation and Application of Automata (CIAA 2019) LNCS	6. 最初と最後の頁 235-247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-23679-3_19	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 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, Xuanrui Qi, Kazunari Tanaka	4. 巻 N.A.
2. 論文標題 Proving Tree Algorithms for Succinct Data Structures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 10th International Conference on Interactive Theorem Proving (ITP 2019)	6. 最初と最後の頁 5:1-5:19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ITP.2019.5	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 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, Takafumi Saikawa	4. 巻 64
2. 論文標題 A Library for Formalization of Linear Error-Correcting Codes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Automated Reasoning	6. 最初と最後の頁 1123--1164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10817-019-09538-8	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 Celestine Sauvage, Reynald Affeldt, David Nowak	4. 巻 1
2. 論文標題 Vers la formalisation en Coq des transformateurs de monades modulaires	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 31st Journees Francophones des Langages Applicatifs (JFLA 2020)	6. 最初と最後の頁 23-30
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 該当する

1. 著者名 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, and Takafumi Saikawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Examples of formal proofs about data compression	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Symposium on Information Theory and Its Applications, Singapore, October 28--31, 2018, IEICE/IEEE Xplore	6. 最初と最後の頁 665-669
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ISITA.2018.8664276	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 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, and Takafumi Saikawa	4. 巻 1
2. 論文標題 Reasoning with conditional probabilities and joint distributions in Coq	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 21st Workshop on Programming and Programming Languages (PPL2019), Iwate-ken, Hanamaki-shi, March 6--8, 2019, JSSST	6. 最初と最後の頁 1-16
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 Mirai Ikebuchi and Keisuke Nakano	4. 巻 1
2. 論文標題 ComplCoq: Rewrite Hint Construction with Completion Procedures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of the Coq Workshop 2018	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 Takahashi Yuta, Asada Kazuyuki, Nakano Keisuke	4. 巻 870
2. 論文標題 Streaming ranked-tree-to-string transducers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 165 ~ 187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2020.12.033	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19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Ayumu Saito, Reynald Affeldt
2. 発表標題 Practical Aspects of Monadic Equational Reasoning in Coq
3. 学会等名 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 (PPL 2022)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 佐藤 哲也, 勝股 審也
2. 発表標題 関係プログラム論理のためのモナド上のダイバージェンス
3. 学会等名 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 (PPL 2022)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Cyril Cohen
2. 発表標題 Formalization of the Lebesgue measure in MathComp-Analysis
3. 学会等名 The Coq Workshop 2021, online, July 2, 2021, Jul 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Xavier Allamigeon, Yves Bertot, Quentin Canu, Cyril Cohen, Pierre Roux, Kazuhiko Sakaguchi, Enrico Tassi, Laurent Thery, Anton Trunov
2. 発表標題 Porting the Mathematical Components library to Hierarchy Builder
3. 学会等名 The Coq Workshop 2021, online, July 2, 2021, Jul 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Cyril Cohen
2. 発表標題 Formalization of measure theory in Coq
3. 学会等名 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 (PPL 2021)
4. 発表年 2020年～2021年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Cyril Cohen
2. 発表標題 Progress report on the formalization of the Lebesgue integral in MathComp-Analysis
3. 学会等名 17th Theorem Proving and Provers Meeting (TPP2021), 2021/11/21-22
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Ayumu Saito, Reynald Affeldt
2. 発表標題 Extending Monae to formalize quicksort using monads in Coq
3. 学会等名 17th Theorem Proving and Provers Meeting (TPP2021), 2021/11/21-22
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Cyril Cohen
2. 発表標題 Formalization of integration theory in Coq
3. 学会等名 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 (PPL 2022)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 才川 隆文
2. 発表標題 Formalizing quantum circuits with MathComp/Ssreflect
3. 学会等名 17th Theorem Proving and Provers Meeting (TPP2021), 2021/11/21-22
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Yuta Takahashi, Kazuyuki Asada, Keisuke Nakano
2. 発表標題 Streaming Ranked-Tree-to-String Transducers
3. 学会等名 24th International Conference on Implementation and Application of Automata (CIAA 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, Xuanrui Qi, Kazunari Tanaka
2. 発表標題 Proving Tree Algorithms for Succinct Data Structures
3. 学会等名 10th International Conference on Interactive Theorem Proving (ITP 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Celestine Sauvage, Reynald Affeldt, David Nowak
2. 発表標題 Vers la formalisation en Coq des transformateurs de monades modulaires
3. 学会等名 31st Journées Francophones des Langages Applicatifs (JFLA 2020)
4. 発表年 2019年～2020年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Cyril Cohen, Marie Kerjean, Assia Mahboubi, Damien Rouhling, Kazuhiko Sakaguchi
2. 発表標題 Competing inheritance paths in dependent type theory: a case study in functional analysis
3. 学会等名 10th International Joint Conference on Automated Reasoning (IJCAR 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, Takafumi Saikawa
2. 発表標題 Formal Adventures in Convex and Conical Spaces
3. 学会等名 13th Conference on Intelligent Computer Mathematics (CICM 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, and Takafumi Saikawa
2. 発表標題 Examples of formal proofs about data compression
3. 学会等名 International Symposium on Information Theory and Its Applications, Singapore, October 28--31, 2018, IEICE/IEEE Xplore (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Reynald Affeldt, Jacques Garrigue, and Takafumi Saikawa
2. 発表標題 Reasoning with conditional probabilities and joint distributions in Coq
3. 学会等名 21st Workshop on Programming and Programming Languages (PPL2019), Iwate-ken, Hanamaki-shi, March 6--8, 2019, JSSST
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Mirai Ikebuchi and Keisuke Nakano
2. 発表標題 ComplCoq: Rewrite Hint Construction with Completion Procedures
3. 学会等名 The Coq Workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小澤 祐也, 中野 圭介
2. 発表標題 定理証明支援系Coqにおける余帰納的証明のガード条件の漸進的検査
3. 学会等名 第121回プログラミング研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小澤 祐也, 中野 圭介
2. 発表標題 定理証明支援系Coqにおける余帰納的証明のガード条件の漸進的検査
3. 学会等名 The 14th Theorem Proving and Provers meeting (TPP 2018)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

A Coq formalization of information theory
<https://github.com/affeldt-aist/infotheo>
Monadic effects and equational reasonig in Coq
<https://github.com/affeldt-aist/monae>

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	勝股 審也 (Katsumata Shin'ya) (30378963)	国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・特任研究員 (62615)	
研究 分担者	中野 圭介 (Nakano Keisuke) (30505839)	東北大学・電気通信研究所・教授 (11301)	
研究 分担者	J Garrigue (Garrigue Jacques) (80273530)	名古屋大学・多元数理科学研究科・教授 (13901)	

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