

令和元年9月5日現在

機関番号：62615

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K11984

研究課題名（和文）相互作用の幾何の確率拡張 圏論的意味論からビッグデータへ

研究課題名（英文）Probabilistic Extension of Geometry of Interaction--from Categorical Semantics to Big Data

研究代表者

蓮尾 一郎 (Ichiro, Hasuo)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・准教授

研究者番号：60456762

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：（離散）確率的関数型プログラミング言語のトークン機械によるシミュレータの実装および、高階・関数型プログラミングと実行時のパラメータ上書きの融合を可能にする言語設計・実行モデル設計・プロトタイプ実装を行った。また確率的関数型プログラミング言語に対する意味論を相互作用の幾何を用い構成した。これはプログラムの実行プロセスを捉えられる内延的な意味論としては初めてのものである。予想しなかった進展としてマルチンゲール概念の定義に関する束論的・圏論的基盤を与えることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

データサイエンスにおける個々のモデルや応用例から独立した汎用処理系・静的解析手法というブレイクスルー達成に向け、数学的基盤の構築とその応用のさきがけとなるプロトタイプ実装を行った。われわれの研究成果は相互作用の幾何という論理学的成果及びその圏論的一般化に基づく理論的手法の社会応用であり、論理学および圏論のもたらす一般性・汎用性に根ざしたデータサイエンスに革新をもたらすための着実な進展である。

研究成果の概要（英文）：We implemented a token-machine simulator of a (discrete) probabilistic functional programming language. We designed a language and an execution model for functional programming that allows parameter updating during program execution, and we gave a prototype implementation of the language. We constructed a denotational semantics for a probabilistic functional programming language with soft conditioning mechanism. This is the first intensional semantics for a probabilistic functional programming language. As an unexpected result, we obtained a lattice-theoretic/category-theoretic framework for the definition of martingale.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：プログラミング言語理論 確率的プログラミング言語 高階計算 プログラム検証 確率的システム 確率的システム検証

様式 C - 19 , F - 19 - 1 , Z - 19 , CK - 19 (共通)

1 . 研究開始当初の背景

[相互作用の幾何] 相互作用の幾何 (GoI, Geometry of Interaction) は, (線形論理の証明図を介して) 関数型プログラムを解釈する表示的意味論の一手法であり, 1987 年に Girard により導入された. (領域理論等の) 他の表示的意味論と比較した際の相互作用の幾何の特徴は, その操作的意味論としての性質にある. すなわち, 相互作用の幾何は, プログラムの実行プロセスをトークン機械などの抽象機械 (もしくは回路のハードウェア) によりモデルするという, 操作的特徴を強く持つ. この特色は, Mackie や Ghica らにより, 関数型プログラミング言語の実装テクニック・コンパイラ導出法に応用されている.

[確率的プログラミング言語] 確率的プログラミング言語は確率分布からのサンプル抽出と条件付確率の計算をプリミティブとした確率的モデルの記述・解析手法を提供する. 個々の確率的モデルごとに, 条件付確率を計算するサンプリング法を実装するという, 間違いを犯しがちなタスクからプログラマを解放することが確率的プログラミング言語の目標である.

2 . 研究の目的

本研究では, 相互作用の幾何を (決定的な計算から) 確率的分岐を持つ計算にシステムティックに拡張し, その成果を確率的プログラムの高効率かつ安全な実装に応用することをめざした. 具体的には, 以下の獲得目標を設定し研究を推進した.

[獲得目標 1] 相互作用の幾何による確率的関数型プログラミング言語の実装を行う. 実装では相互作用の幾何から得られる関数型プログラムのトークン機械によるシミュレータを FPGA がターゲットになるよう拡張する. また確率操作に関する既存の実装手法との融合を図る. さらに実装の効率化に向け bounded linear logic を用いた理論的基盤整備を行う.

[獲得目標 2] 確率的関数型プログラミング言語の相互作用の幾何による意味論を与える. ここで得られる確率的プログラムのトークン機械への翻訳に統計モデル固有の静的解析手法および確率的遷移系に対する種々の形式検証手法を適用し確率的関数型プログラミング言語に対する静的解析アルゴリズムを開発する.

3 . 研究の方法

上記の目的 (特に 2 つの獲得目標) に対し, 次の具体的トピックについて, 同時進行的に研究を行った.

確率的操作を可能にするハードウェアの研究

既存の統計モデル解析手法及びモデル検査等の確率的形式検証手法の統合と援用

ハードウェア実装の高速化に向けた, (CSL-LICS ' 14 論文で樹立した) メモリ付き相互作用の幾何の手法と, (2018 年度から研究体制に加わった室屋氏の研究による) グラフ書き換えに基づいた相互作用の幾何の融合

ツール実装

メモリ付き相互作用の幾何による確率的関数型プログラミング言語の意味論の構築

4 . 研究成果

上記のように推進した研究は順調に発展し, 理論計算機科学の最高峰国際会議 LICS 論文 6 報, プログラミング言語分野の最高峰国際会議 POPL 論文 3 報を含む, 24 報の論文に結実した. 以下, その内容について, 上記獲得目標に沿った形で概説する.

[獲得目標 1 に対する成果] (離散) 確率的関数型プログラミング言語のトークン機械によるシミュレータの実装 [Muroya+, POPL ' 16] および, 高階・関数型プログラミングと実行時のパラメータ上書きの融合を可能にする言語設計・実行モデル設計・プロトタイプ実装を行った (論文準備中). 後者の実行モデルにおける相互作用の幾何とグラフ書き換え系の融合により, プログラムの実行コストの解析が可能になる.

4 年間の研究期間においては, プログラムの数理的意味論に立脚した correct-by-construction の処理系を与えるという本研究の方針から, 意味論レベルの研究にまず注力した. それゆえ, 研究範囲をハードウェアまで押し広げることは叶わなかったが, グラフ書き換えと

いう新たな効率化手法との融合を行うことで（上記「3. 研究の方法」の ），効率的ハードウェア実装への地ならしができた。

[獲得目標2に対する成果] 確率的関数型プログラミング言語に対する意味論を相互作用の幾何を用い構成した [Muroya+, POPL ' 16] [Dal Lago+, LICS ' 19] . 特に後者の成果は，プログラムの実行プロセスを捉えられる内延的な意味論としては初めてのものである．この意味論を通じて，同じく本研究において得られた（「予想しなかった進展」として後述）非高階の確率的プログラム解析手法の，高階プログラムへの応用が期待できる．

[予想しなかった進展：非高階確率的計算の静的解析手法と数学的基礎] 上記に加えて，一階（非高階）の確率的プログラムに対する静的解析手法（特に可達性確率計算アルゴリズム）について研究を推進した．ここでは，マルチンゲール概念の定義に関する束論的・圏論的基盤を得るとともに（[Hasuo+, POPL ' 16] [Urabe+, LICS ' 17] など），この基盤から新たな自動検証手法を複数導出し，数理最適化アルゴリズムによる実装を与えた [Takisaka+, ATVA ' 18] [Kura+, TACAS ' 19] .

上述の通り，これらの静的解析手法を高階確率的プログラムに適用することが次なる目標であり，このための基盤となるのが [Dal Lago+, LICS ' 19] の相互作用の幾何による意味論である．

以上をまとめる．高効率・高信頼の関数型確率プログラミング言語処理系という応用上の目標を掲げて推進した本科研費研究においては，処理系の実装という応用面においては発展の余地を残した一方で（たとえばFPGAによるハードウェア実装など），「明確な応用上の目標が牽引する理論研究」としての成果は想定を大きく超えるものであった．当該分野の最高峰国際会議論文を含む多数の出版論文の理論的成果は，上記の応用上の目標に対する確かな基盤を与えるものである．これをもって，本研究の成果は，挑戦的萌芽研究としての本研究に期待されたレベルを十分に達成するものと結論する．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 24 件)

1. Ugo dal Lago, Naohiko Hoshino. The Geometry of Bayesian Programming. Thirty-Fourth Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2019), 2019. 査読有, 採択済
2. Yuichi Komorida, Shin-ya Katsumata, Nick Hu, Bartek Klin, Ichiro Hasuo. Codensity Games for Bisimilarity. Thirty-Fourth Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2019), 2019. 査読有, 採択済
3. Satoshi Kura, Natsuki Urabe, Ichiro Hasuo. Tail Probabilities for Randomized Program Runtimes via Martingales for Higher Moments. 25th International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS 2019), Lecture Notes in Computer Science 11428, pp.135-153, 2019. 10.1007/978-3-030-17465-1_8, 査読有
4. Toru Takisaka, Yuichiro Oyabu, Natsuki Urabe, Ichiro Hasuo. Ranking and Repulsing Supermartingales for Reachability in Probabilistic Programs. 16th International Symposium on Automated Technology for Verification and Analysis (ATVA 2018), Lecture Notes in Computer Science 11138, pp.476-493, 2018. 10.1007/978-3-030-01090-4_28, 査読有
5. Natsuki Urabe, Ichiro Hasuo. Categorical Buechi and Parity Conditions via Alternating Fixed Points of Functors. 14th IFIP WG 1.3 International Workshop on Coalgebraic Methods in Computer Science (CMCS 2018), Lecture Notes in Computer Science 11202, pp.214-234, 2018. 10.1007/978-3-030-01090-4_28, 査読有
6. Ichiro Hasuo, Naohiko Hoshino. Semantics of higher-order quantum computation via geometry of interaction. Annals of Pure and Applied Logic 168, pp.404-469, 2017. 10.1016/j.apal.2016.10.010, 査読有
7. Takamasa Okudono, Yuki Nishida, Kensuke Kojima, Kohei Suenaga, Kengo Kido, Ichiro Hasuo. Sharper and Simpler Nonlinear Interpolants for Program Verification. 15th Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS 2017), Lecture Notes in Computer Science 10695, pp.491-513, 2017. 10.1007/978-3-319-71237-6_24, 査読有

8. Corina Cirstea, Shunsuke Shimizu, Ichiro Hasuo. Parity Automata for Quantitative Linear Time Logics. Seventh Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science (CALCO 2017), Leibniz International Proceedings in Informatics 72, 2017. 10.4230/LIPIcs.CALCO.2017.7, 査読有
9. Naohiko Hoshino. Partial Traces on Additive Categories. Proc. MFPS 2018, Electr. Notes Theor. Comput. Sci. 341: 219-237, 2017. 10.1016/j.entcs.2018.11.011, 査読有
10. Koko Muroya, Steven W. T. Cheung, Dan R. Ghica. The Geometry of Computation-Graph Abstraction. Thirty-Third Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2018), pp.749-758, 2018. 10.1145/3209108.3209127, 査読有
11. Steven W. T. Cheung, Victor Darvari, Dan R. Ghica, Koko Muroya, Reuben N. S. Rowe. A Functional Perspective on Machine Learning via Programmable Induction and Abduction. Fourteenth International Symposium on Functional and Logic Programming (FLOPS 2018), Lecture Notes in Computer Science 10818, pp.84-98, 2018. 10.1007/978-3-319-90686-7_6, 査読有
12. Natsuki Urabe, Masaki Hara, Ichiro Hasuo. Categorical Liveness Checking by Corecursive Algebras. Thirty-Second Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2017), IEEE, pp.1-12, 2017. 10.1109/LICS.2017.8005151, 査読有
13. Ugo Dal Lago, Ryo Tanaka, Akira Yoshimizu. The Geometry of Concurrent Interaction: Handling Multiple Ports by Way of Multiple Tokens. Thirty-Second Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2017), pp.1-12, 2017. 10.1109/LICS.2017.8005112, 査読有
14. Ugo Dal Lago, Claudia Faggian, Benoît Valiron, and Akira Yoshimizu. 2017. The geometry of parallelism: classical, probabilistic, and quantum effects. In Proceedings of the 44th ACM SIGPLAN Symposium on Principles of Programming Languages (POPL 2017). ACM, New York, NY, USA, pp. 833-845. DOI: <https://doi.org/10.1145/3093333.3009859> 査読有
15. Wataru Hino, Hiroki Kobayashi, Ichiro Hasuo, and Bart Jacobs. 2016. Healthiness from Duality. In Proceedings of the 31st Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS '16). ACM, New York, NY, USA, pp. 682-691. DOI: <https://doi.org/10.1145/2933575.2935319> 査読有
16. Ichiro Hasuo. Coalgebras and Higher-Order Computation: a GoI Approach. In Delia Kesner and Brigitte Pientka, editors, 1st International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2016), volume 52 of Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), pages 2:1-2:2, Dagstuhl, Germany, 2016. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik. DOI: 10.4230/LIPIcs.FSCD.2016.2 査読有
17. Natsuki Urabe, Shunsuke Shimizu, and Ichiro Hasuo. Coalgebraic Trace Semantics for Buechi and Parity Automata. In Josee Desharnais and Radha Jagadeesan, editors, 27th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR 2016), volume 59 of Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), pages 24:1-24:15, Dagstuhl, Germany, 2016. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik. DOI: 10.4230/LIPIcs.CONCUR.2016.24 査読有
18. Ichiro Hasuo, Shunsuke Shimizu, and Corina Cirstea. 2016. Lattice-theoretic progress measures and coalgebraic model checking. In Proceedings of the 43rd Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL 2016). ACM, New York, NY, USA, pp. 718-732. DOI: <https://doi.org/10.1145/2837614.2837673> 査読有
19. Koko Muroya, Naohiko Hoshino, and Ichiro Hasuo. 2016. Memoryful geometry of Interaction II: recursion and adequacy. In Proceedings of the 43rd Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL 2016). ACM, New York, NY, USA, pp. 748-760. DOI: <https://doi.org/10.1145/2914770.2837672> 査読有
20. Kengo Kido, Swarat Chaudhuri, and Ichiro Hasuo. Abstract interpretation with infinitesimals. In Barbara Jobstmann and K. Rustan M. Leino, editors, Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation, pages 229-249, Berlin, Heidelberg, 2016. Springer Berlin Heidelberg. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49122-5_11 査読有
21. Shota Nakagawa and Ichiro Hasuo. Near-optimal scheduling for ltl with future discounting. In Pierre Ganty and Michele Loreti, editors, Trustworthy Global Computing,

- pages 112-130, Cham, 2016. Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-28766-9_8 査読有
22. Natsuki Urabe and Ichiro Hasuo. Coalgebraic Infinite Traces and Kleisli Simulations. In Lawrence S. Moss and Pawel Sobocinski, editors, 6th Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science (CALCO 2015), volume 35 of Leibniz International Proceedings in Informatics (LIPIcs), pages 320-335, Dagstuhl, Germany, 2015. Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik. DOI: 10.4230/LIPIcs.CALCO.2015.320 査読有
23. Ichiro Hasuo. Generic weakest precondition semantics from monads enriched with order. *Theoretical Computer Science*, 604:2 - 29, 2015. Coalgebraic Methods in Computer Science. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tcs.2015.03.047> 査読有
24. Takumi Akazaki and Ichiro Hasuo. Time robustness in mtl and expressivity in hybrid system falsification. In Daniel Kroening and Corina S. Pasareanu, editors, *Computer Aided Verification*, pages 356-374, Cham, 2015. Springer International Publishing. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-21668-3_21 査読有

[学会発表](計 23 件)

1. Satoshi Kura, Natsuki Urabe, Ichiro Hasuo. Tail Probabilities for Randomized Program Runtimes via Martingales for Higher Moments. 25th International Conference on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems (TACAS 2019).
2. Toru Takisaka, Yuichiro Oyabu, Natsuki Urabe, Ichiro Hasuo. Ranking and Repulsing Supermartingales for Reachability in Probabilistic Programs. 16th International Symposium on Automated Technology for Verification and Analysis (ATVA 2018).
3. Ichiro Hasuo. Martingale-Based Methods for Reachability Probabilities: Excitements and Afterthoughts in Coalgebras. Coalgebra, Now @ FLoC 2018 Workshop, Oxford, UK, 2018.
4. Ichiro Hasuo. Coalgebras and Higher-Order Computation: a GoI Approach. Game Semantics 25 Workshop, Oxford, UK, 2018.
5. Ichiro Hasuo. Approximating Reachability Probabilities by (Super-)Martingales. SynCoP 2018, Thessaloniki, Greece, 2018.
6. Natsuki Urabe, Ichiro Hasuo. Categorical Buechi and Parity Conditions via Alternating Fixed Points of Functors. 14th IFIP WG 1.3 International Workshop on Coalgebraic Methods in Computer Science (CMCS 2018).
7. Takamasa Okudono, Yuki Nishida, Kensuke Kojima, Kohei Suenaga, Kengo Kido, Ichiro Hasuo. Sharper and Simpler Nonlinear Interpolants for Program Verification. 15th Asian Symposium on Programming Languages and Systems (APLAS 2017).
8. Corina Cirstea, Shunsuke Shimizu, Ichiro Hasuo. Parity Automata for Quantitative Linear Time Logics. Seventh Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science (CALCO 2017).
9. Naohiko Hoshino. Partial Traces on Additive Categories. 34th Conference on the Mathematical Foundations of Programming Semantics (MFPS 2018)
10. Koko Muroya, Steven W. T. Cheung, Dan R. Ghica. The Geometry of Computation-Graph Abstraction. Thirty-Third Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2018).
11. Steven W. T. Cheung, Victor Darvari, Dan R. Ghica, Koko Muroya, Reuben N. S. Rowe. A Functional Perspective on Machine Learning via Programmable Induction and Abduction. Fourteenth International Symposium on Functional and Logic Programming (FLOPS 2018).
12. Natsuki Urabe, Masaki Hara, Ichiro Hasuo. Categorical Liveness Checking by Corecursive Algebras. Thirty-Second Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2017).
13. Ugo Dal Lago, Ryo Tanaka, Akira Yoshimizu. The Geometry of Concurrent Interaction: Handling Multiple Ports by Way of Multiple Tokens. Thirty-Second Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2017).
14. Ugo Dal Lago, Claudia Faggian, Benoît Valiron, and Akira Yoshimizu. 2017. The geometry of parallelism: classical, probabilistic, and quantum effects. In *Proceedings of the 44th ACM SIGPLAN Symposium on Principles of Programming Languages (POPL 2017)*.

15. Wataru Hino, Hiroki Kobayashi, Ichiro Hasuo, and Bart Jacobs. 2016. Healthiness from Duality. In Proceedings of the 31st Annual ACM/IEEE Symposium on Logic in Computer Science (LICS 2016).
16. Ichiro Hasuo. Coalgebras and Higher-Order Computation: a GoI Approach. In Delia Kesner and Brigitte Pientka, editors, 1st International Conference on Formal Structures for Computation and Deduction (FSCD 2016).
17. Natsuki Urabe, Shunsuke Shimizu, and Ichiro Hasuo. Coalgebraic Trace Semantics for Buechi and Parity Automata. In Josee Desharnais and Radha Jagadeesan, editors, 27th International Conference on Concurrency Theory (CONCUR 2016).
18. Ichiro Hasuo, Shunsuke Shimizu, and Corina Cirstea. 2016. Lattice-theoretic progress measures and coalgebraic model checking. In Proceedings of the 43rd Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL 2016).
19. Koko Muroya, Naohiko Hoshino, and Ichiro Hasuo. 2016. Memoryful geometry of Interaction II: recursion and adequacy. In Proceedings of the 43rd Annual ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages (POPL 2016).
20. Kengo Kido, Swarat Chaudhuri, and Ichiro Hasuo. Abstract interpretation with infinitesimals. Verification, Model Checking, and Abstract Interpretation, (VMCAI 2016).
21. Shota Nakagawa and Ichiro Hasuo. Near-optimal scheduling for ltl with future discounting. Trustworthy Global Computing, (TGC 2016).
22. Natsuki Urabe and Ichiro Hasuo. Coalgebraic Infinite Traces and Kleisli Simulations. 6th Conference on Algebra and Coalgebra in Computer Science (CALCO 2015).
23. Takumi Akazaki and Ichiro Hasuo. Time robustness in mtl and expressivity in hybrid system falsification. Computer Aided Verification, (CAV 2015).

〔図書〕(計 1 件)

Ichiro Hasuo and Prakash Panangaden, editors. Special Issue on Quantum Physics and Logic (QPL 2014). New Generation Comput. 34(1-2): 1-2, 2016.

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕本研究の成果であるツール実装：<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~kmuroya/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 星野 直彦

ローマ字氏名: HOSHINO, Naohiko

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 数理解析研究所

職名: 助教

研究者番号(8桁): 20611883

研究分担者氏名: 室屋 晃子 (2018/06/01 より参加)

ローマ字氏名: MUROYA, Koko

所属研究機関名: 京都大学

部局名: 数理解析研究所

職名: 助教

研究者番号(8桁): 00827454

(2)研究協力者 なし

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。