

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24680001

研究課題名(和文)新パラダイム計算をねじふせる 多様な意味論的手法の合同・発展・応用

研究課題名(英文) Taming New Computing Paradigms: Diverse Techniques in Semantics United, Enhanced and Applied

研究代表者

蓮尾 一郎 (Hasuo, Ichiro)

東京大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：60456762

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,800,000円

研究成果の概要(和文)：計算機の応用領域の多様化などに伴いその社会的重要性が急速に増しつつある(物理情報システムや量子計算などの)新パラダイム計算に対して、その数学的本質の理解が計算システムの品質向上に資するという確信のもと、計算機科学における意味論的諸手法を結集・合同してこの応用上の困難に立ち向かうと共に、この新たな応用に牽引される形で意味論研究の理論的發展を行うことを目指した。当初計画に挙げた獲得目標を(より幅広い形で)ほぼ達成すると共に、理論研究ならではの広範な展開、予想しなかったトピック間のつながりの発見に成功した。

研究成果の概要(英文)：With the application domains of computer systems diversifying rapidly, we are seeing a number of new computing paradigms (such as cyber-physical systems and quantum computation) increasing their relevance in the society. With the belief that understanding of their mathematical nature is vital in quality assurance of such computing systems, we aimed at unifying the semantical techniques that have been developed over years in computer science, and at coping with the emerging challenges of new computing paradigms thereby. Additionally we have also aimed at comprehensive enhancement of semantical techniques that is driven by the new applicational challenges. We have achieved the concrete goals we set in the beginning of the current research project, in ways that are broader than we had foreseen. Moreover our theoretical approach has led to some unexpected relationships and collaborations between different topics.

研究分野：理論計算機科学

キーワード：新パラダイム計算 計算の意味論 プログラミング言語 形式検証 物理情報システム 量子計算 関数型プログラミング 圏論

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 新パラダイム計算

計算機の応用領域の多様化や、シリコンチップの速度向上の物理的限界等の理由により、近年ハイブリッドシステムや量子計算など、さまざまな新パラダイム計算が立ち現われてきた。これらの新しい計算の概念は急速に実世界応用が進んでおり、その科学的理解及び工学的品質保証が急務である。

### (2) 計算の意味論

自然現象・社会現象・生物現象など、さまざまな現象の理解のためには数理モデルの構築が欠かせない。情報科学において計算という現象の数理モデル化を目指すのが計算の意味論という研究分野である。その研究成果は、プログラムやシステムの正しさを数学的に保証する形式検証の理論的基礎をなす。

### (3) 新パラダイム計算の意味論 意味論的諸手法の合同

新パラダイム計算の科学的理解及びその応用としての品質保証手法においては、意味論的研究による新パラダイム計算の数理的本質の定式化と解析が有効なアプローチとなる。研究開始時において研究代表者らは、圏論(余代数・トレース付きモノイダル圏)を用いた量子高階計算の意味論や、超準解析を用いた物理情報システムのモデリング・検証手法など、すでにいくつかの成果をあげたところであった。

## 2. 研究の目的

本研究課題においては、新パラダイム計算という具体的な情報科学的応用対象を設定することで、長年の研究によって発展してきた意味論的諸手法を合同し、理論・応用相互に正の刺激を与える上向きスパイラルを目指した。このスローガンのもと、特に以下の様な獲得目標を設定した。

### (1) 応用上の獲得目標

#### ハイブリッドシステムの自動検証

プログラムの自動検証の諸手法を(離散的デジタルダイナミクスと連続的物理ダイナミクスをあわせもち、物理情報システムの重要な一側面とされる)ハイブリッドシステムに拡張し、さまざまな工業製品の品質向上を行うことを目指した。

#### 高階量子計算のための抽象機械

Mackie や Ghica 等による(古典)高階関数型計算に対する GoI 抽象機械に量子計算プリミティブを導入し、初の抽象高階量子計算機の定義を目指した。

### (2) 理論上の獲得目標

上記の応用目標に必要な意味論的研究とともに、関連する数学的理論自身を論理学及び圏論の数学的言語で書き下す「メタ理

論」的研究を目指した。たとえば計算の意味論を一階述語論理または topos の internal language で書き下し、それらを別の universe (または圏)で解釈することによる理論拡張がその一例である。

## 3. 研究の方法

### (1) 応用のみならず理論にも牽引される広汎な研究推進

ともすれば自己目的化・タコツボ化しがちな理論研究において、本研究では新パラダイム計算(特に物理情報システムと高階量子計算)という応用目標を明確に設定し、これらが理論研究を牽引する「健全な」研究推進を目指した。その一方で理論研究ならではの(セレンディピティ的な)当初予測しなかったトピック相互のつながり、協働及び新たな応用対象の同定についても、同時に積極的に追求した。

### (2) 自動化・プロトタイプ実装による実用化志向

計算機科学的システム解析手法の実世界応用を目指すにあたり、特に産業界での使用に向けてはユーザビリティの向上、特に自動化が欠かせない。本研究ではグラフアルゴリズムや SAT、(線形計画法等の)数理的最適化アルゴリズム、(焼きなまし法等の)確率的最適化アルゴリズムの利用を重視し、システム解析の(構造的に複雑な)問題を意味論的手法によって(先に上げた)既存のさまざまなアルゴリズムに帰着させる、という方針をとって、研究成果の実用化を目指した。これに付随してプロトタイプツールの実装も積極的に行った。

### (3) 旗艦国際会議発表を通じた国際的 visibility の獲得

計算機科学では国際会議予稿集論文が研究業績として評価され、特に各分野の旗艦国際会議における論文は時に学術誌論文以上に注目される。本研究では研究成果をこのような旗艦国際会議において発表することで国内外の注目を集め、共同研究の裾野を広げ、より大規模な研究推進の体制を醸成することを目指した。

## 4. 研究成果

### (1) ハイブリッドシステム・物理情報システム研究: 超準解析アプローチの発展と、falsification という新たなアプローチによる産学・国際協力

応用上の獲得目標 2-(1)- に対して、抽象解釈による超準解析的アプローチの実効性向上と、falsification を通じたより産業界の現場に近い手法の研究、この双方を通じて、当初計画より幅広い研究の進展と成果を得た。詳細は以下のとおり。

#### 超準解析的アプローチ

ハイブリッドシステムの自動検証という獲

得目標については、まず、研究開始当初想定した超準解析アプローチの実用性向上に注力した。超準解析の topos 論的定式化に関する Moerdijk, Palmgren らの結果の拡張[片岡, 修士論文]および超準プログラミング言語意味論の移転原理による導出[木戸, 卒業論文]等の理論的成果と同時に行ったのが、静的解析におけるスケラブルな手法として広く知られる Cousot-Cousot の抽象解釈の超準拡張である。学生の木戸氏にインターンを機に始まったこの研究においては、Chaudhuri 氏 (Rice 大) という共同研究者を得て、理論的枠組の樹立及びいくつかのハイブリッドダイナミクスの自動検証を行う (ポリヘドロンを用いる) プロトタイプ実装を行うことができた。この成果は静的解析分野の主要国際会議 VMCAI '16 において発表された[木戸, Chaudhuri&蓮尾, VMCAI16]。現在この成果の拡張について、ポリヘドロン以外の抽象領域 (ellipsoid 等) を用いることを検討中である。

#### falsification アプローチ

また上記とは別に、産業界の研究者との議論を通じて falsification の問題の重要性を認識し、これについて研究を行った。自動車等の大規模な物理情報システムにおいてはその複雑さがほとんどの形式検証手法のスケラビリティを上回るため、産業界の現状においては (バグが一つもないことを数学的に証明する) 形式検証よりも、(動的・適応的にテストケースを生成し貪欲にバグを見つけに行く) falsification に対する需要が高い。Falsification は典型的には (焼きなまし等, hill-climbing スタイルの) 確率的最適化アルゴリズムを用いるため、そのスケラビリティも実用に堪えることが多い。この方向性において先駆的な Fainekos, Pappas, Donze, Maler らの成果を受けて、我々は仕様記述言語に平均化時相演算子を導入し、ロバスト値と呼ばれる連続的真偽値をよりなめらかにすることで hill-climbing スタイルの最適化を助ける研究を行った。この成果は形式検証分野の旗艦国際会議 CAV '15 において発表され[赤崎&蓮尾, CAV15]、さらに優秀論文として学術誌特集号に招待された (現在査読中)。

(2) 高階関数型プログラムにおける計算効果：確率的分岐を包括する広範な研究展開論文[蓮尾&星野, LICS11]の成果をもとに開始したこの研究は、新たな国内外の研究協力者を得て当初想定を超える広範な展開を見せた。応用上の獲得目標 2-(1)- に対しては、量子計算に特化したトークン機械の定義を与えると同時に、量子効果よりも一般的な代数的計算効果に対して GoI 意味論を圏論的に与えることに成功した。詳細は以下のとおり。

#### トークン機械による具体的 GoI

量子計算に対する抽象機械については、上記圏論的アプローチとは別にトークン機械に

よる抽象機械の具体的操作的定義に基づく研究を行った。これは学生の由水氏、共同研究者の Dal Lago 氏 (Inria & Bologna 大), Faggian 氏 (パリ第 7 大), Valiron 氏 (CentraleSupélec) と共同で行った研究であり、特にトークンを複数用いる抽象機械について顕著な理論的進展があった。量子計算に対してこれを適用する論文をプログラミング言語分野の主要会議 ESOP '14 及び理論計算機科学の旗艦会議 CSL-LICS '14 にて発表し[由水, 蓮尾, Faggian & Dal Lago, ESOP14][Dal Lago, Faggian, 蓮尾&由水, CSL-LICS14]、さらにこの抽象機械は (量子計算のみならず) 値呼び・名前呼び評価戦略の特徴付けという高階計算における古典的問題の解を与えることも示された [Dal Lago, Faggian, Valiron & 由水, LICS15]。これは量子計算から始まった GoI 研究が当初想定とは異なる広範な展開を見せた好例であり、これらの共同研究は JSPS-Inria 二国間共同研究プロジェクトの嚆矢となった (2015-2017 年度)。当該プロジェクトでは現在、並行高階計算に対する GoI 意味論の研究を行っている。

余代数との組み合わせによる「メモリ付き GoI」

当初計画の圏論的 GoI の研究をさらに推進し、トークン機械の基礎となる proof net に内部状態 (メモリ) を付加することによりさまざまな計算効果を扱える枠組み「メモリ付き GoI」を考案した。GoI における計算効果や (ボール型真偽値等の) 加法的型構成子の扱いは容易でないことが広く知られており、その対処法としては加法的スライスなる手法が用いられていた。この加法的スライスの圏論的構造化とみなせる本成果では、状態遷移系の圏論的表現たる余代数とそれらの組み合わせのための代数系たるコンポーネント計算を用い、Plotkin や Power らによる代数的計算効果を持つ高階計算系に対して統一的に代表的意味論を与える枠組みを与えた。この成果は理論計算機科学の旗艦会議 CSL-LICS '14 及びプログラミング言語分野の旗艦会議 POPL '16 にて発表された[星野, 室屋&蓮尾, CSL-LICS14][室屋, 星野&蓮尾, POPL16]。

メモリ付き GoI と確率的プログラミング言語

以上の研究進展の間に、(数学的には量子的計算効果の特殊な場合とみなせる) 確率的計算効果の重要性について認識を新たにし、集中的に研究を行った。これは、確率的計算効果の応用上の重要性 (データサイエンスのプログラミング基盤として確率的プログラミング言語が注目されつつある) 及び上記理論的成果との相性の良さゆえである。成果としては、上記メモリ付き GoI を確率的言語に適用して得た抽象機械のプロトタイプ実装を行いウェブに公開した (<http://koko-m.github.io/TtT/>)。現在 GoI

抽象機械に基づく確率的プログラムの (belief propagation 式の) 静的解析手法について, 研究を行っている.

(3) 余代数と不動点論理: 圏論的理論から定量的モデル検査手法へ

余代数とは状態遷移系の圏論的抽象化であり, ベースとなる圏と振舞タイプを表す関手を取り替えることで, 古典的なオートマトンから確率的分岐を行う Markov 鎖や Markov 決定プロセス, 交替性の分岐を持つゲームなど, さまざまなダイナミクスを統一的に表現できる. 上記のように GoI の計算効果拡張にも用いたこの概念について研究を行い, 以下のような研究成果を得た.

余代数的模倣関係の理論

[蓮尾, CONCUR06] の余代数的模倣関係の理論を学生のト部氏とともに拡張し, その成果が論文 [ト部&蓮尾, CONCUR14] [ト部&蓮尾, CALCO15] として出版された. 特に前者は, 並行システム分野のトップ国際会議 CONCUR'14 において最優秀論文賞を受賞した. 前者は [蓮尾, CONCUR06] の理論的枠組をもとに, 半環上の定量的システムの間での模倣関係を探索するアルゴリズムについて研究した成果であり, もともとの問題を, (線形計画法等で) 適切な行列を求める問題に帰着している. 後者では [蓮尾, CONCUR06] の模倣関係の概念が (有限トレースのみならず) 無限トレースの間での包含関係を示すことにも使えることを示した.

余代数的不動点論理とモデル検査の理論仕様記述のために広く用いられる時相論理において, (最大・最小) 不動点演算子は論理体系の表現能力向上のために重要な役割を果たす一方, その理論的取り扱いはいさばしば複雑である. 最大不動点演算子に注目してその圏論的理論における構成を研究した成果 [蓮尾, 長, 片岡 & Jacobs, MFPS13] のうち, 我々はパリティゲームに対する Jurdzinski のアルゴリズムの数学的本質の束論的定式化に成功し, 余代数的様相論理と組み合わせて一般的モデル検査アルゴリズムを導出した. この成果はプログラミング言語分野の旗艦国際会議 POPL'16 にて発表された [蓮尾, 清水, Cirstea, POPL16]. この成果と, 上記の余代数的模倣関係の理論との関係についても研究を進め, 現在論文が査読中である. さらに Lyapunov 関数を通じた制御理論との関係と物理情報システムへの応用についても, 現在研究を行っている.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 19 件)

Wataru Hino, Hiroki Kobayashi, Ichiro Hasuo and Bart Jacobs. Healthiness from Duality. To appear in Proc. LICS 2016, 2016. 査読有. 採択決定済み.

Ichiro Hasuo, Shunsuke Shimizu, and

Corina Cirstea. Lattice-theoretic progress measures and coalgebraic model checking. Proc. POPL 2016, p. 718-732. ACM Press, 2016. 査読有.

doi>10.1145/2914770.2837673

Koko Muroya, Naohiko Hoshino and Ichiro Hasuo. Memoryful Geometry of Interaction II: Recursion and Adequacy. Proc. POPL 2016, p. 748-760, 2016. 査読有. doi>10.1145/2914770.2837672

Ichiro Hasuo. Generic Weakest Precondition Semantics from Monads Enriched with Order. Theoretical Computer Science, 604:2-29, 2015. 査読有. doi:10.1016/j.tcs.2015.03.047

Takumi Akazaki and Ichiro Hasuo. Time Robustness in MTL and Expressivity in Hybrid System Falsification. Proc. CAV 2015, Lect. Notes in Comp. Sci. vol. 9207, p. 356-374, 2015. 査読有.

DOI: 10.1007/978-3-319-21668-3\_21

Natsuki Urabe and Ichiro Hasuo. Generic Forward and Backward Simulations III: Quantitative Simulations by Matrices. Proc. CONCUR 2014, Lect. Notes in Comp. Sci. vol. 8704, p. 451-466, 2014. 査読有. Best Paper Award.

DOI: 10.1007/978-3-662-44584-6\_31

Naohiko Hoshino, Koko Muroya and Ichiro Hasuo. Memoryful Geometry of Interaction: From Coalgebraic Components to Algebraic Effects. Proc. CSL-LICS 2014, paper 52, 2014. 査読有.

doi>10.1145/2603088.2603124

Ugo Dal Lago, Claudia Faggian, Ichiro Hasuo and Akira Yoshimizu. The Geometry of Synchronization. Proc. CSL-LICS 2014, paper 35, 2014. 査読有.

doi>10.1145/2603088.2603154

Ichiro Hasuo. Generic Weakest Precondition Semantics from Monads Enriched with Order. Proc. CMCS 2014, Lect. Notes in Comp. Sci. vol. 8446, p. 10-32, 2014. 招待論文, 査読有.

DOI: 10.1007/978-3-662-44124-4\_2

Kohei Suenaga, Hiroyoshi Sekine, and Ichiro Hasuo. Hyperstream Processing Systems: Nonstandard Modeling of Continuous-Time Signals. Proc. POPL 2013, p. 417-430, 2013. 査読有.

doi>10.1145/2429069.2429120

Ichiro Hasuo and Kohei Suenaga. Exercises in Nonstandard Static Analysis of Hybrid Systems. Proc. CAV 2012, Lect. Notes in Comp. Sci. vol. 7358, p. 462-478, 2012. 査読有.

DOI: 10.1007/978-3-642-31424-7\_34

[学会発表] (計 17 件)

Wataru Hino, Hiroki Kobayashi, Ichiro

Hasuo and Bart Jacobs. Healthiness from Duality. LICS 2016, 2016/7/5-8, New York, USA.

Ichiro Hasuo, Shunsuke Shimizu, and Corina Cirstea. Lattice-theoretic progress measures and coalgebraic model checking. POPL 2016, 2016/1/20-23, St. Petersburg, USA.

Koko Muroya, Naohiko Hoshino and Ichiro Hasuo. Memoryful Geometry of Interaction II: Recursion and Adequacy. POPL 2016, 2016/1/20-23, St. Petersburg, USA.

Takumi Akazaki and Ichiro Hasuo. Time Robustness in MTL and Expressivity in Hybrid System Falsification. CAV 2015, 2015/7/18-24, San Fransisco, USA.

Natsuki Urabe and Ichiro Hasuo. Generic Forward and Backward Simulations III: Quantitative Simulations by Matrices. CONCUR 2014, 2014/9/2-5, Rome, Italy.

Naohiko Hoshino, Koko Muroya and Ichiro Hasuo. Memoryful Geometry of Interaction: From Coalgebraic Components to Algebraic Effects. CSL-LICS 2014, 2014/7/14-18, Vienna, Austria.

Ugo Dal Lago, Claudia Faggian, Ichiro Hasuo and Akira Yoshimizu. The Geometry of Synchronization. CSL-LICS 2014, 2014/7/14-18, Vienna, Austria.

Ichiro Hasuo. Generic Weakest Precondition Semantics from Monads Enriched with Order. CMCS 2014, 2014/4/5-6, Grenoble, France.

蓮尾 一郎. 超準解析による物理情報システムの形式検証 離散から連続・ハイブリッドへ. 日本数学会 秋季総合分科会 企画特別講演(招待講演), 2013.9.27, 愛媛大学(愛媛県松山市).

Kohei Suenaga, Hiroyoshi Sekine, and Ichiro Hasuo. Hyperstream Processing Systems: Nonstandard Modeling of Continuous-Time Signals. POPL 2013, 2013/1/23-25, Rome, Italy.

Ichiro Hasuo and Kohei Suenaga. Exercises in Nonstandard Static Analysis of Hybrid Systems. CAV 2012, 2012/7/7-13, Berkeley, USA.

〔図書〕(計1件)

圏論の歩き方委員会(編集), 日本評論社, 圏論の歩き方, 2015, 295 ページ. 編集の取りまとめ, 及び全体のうち2章の執筆を担当.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 制御入力値生成装置、制御入力値生

成方法、および、プログラム

発明者: 赤崎拓未, 蓮尾一郎, 末永幸平

権利者: 科学技術振興機構

種類: 特許

番号: 特願 2014-72623

出願年月日: 2014年3月31日

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

東京大学蓮尾研ウェブページ

<http://www.mmm.is.s.u-tokyo.ac.jp/>

研究者個人ウェブページ

<http://www.mmm.is.s.u-tokyo.ac.jp/~ichiro/>

Go! コンパイラのウェブ実装

<http://koko-m.github.io/TtT/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

蓮尾 一郎 (HASUO, Ichiro)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・准教授

研究者番号: 60456762