

助教 郡茉友子 (圏論・束論的不動点理論)

形式検証やプログラム意味論などの分野に現れる不動点に関して、(1) 不動点の性質の研究や、(2) 不動点の手法の圏論および束論に基づく抽象化などを行っている。

(1) では、不動点の唯一性や対応に関する研究を行った。不動点の唯一性に関しては、ファイブレーションという関手を用いた枠組みで、最小不動点と最大不動点の一致の十分条件を明らかにした [2]。一般に、最小不動点は有有限・整礎的な構造を、最大不動点は無限的・非停止的な構造を表し、この両者が一致することは意味論において本質的な意義を持つ。この研究では特に最小不動点の上で、最小不動点と最大不動点が一一致するための十分条件を与えた。また、検証では最小不動点と最大不動点の問題では使える検証手法が異なるが、これらが一一致しているときは両方の手法が使えることを活用し、新たな手法を提案した。

不動点の対応に関しては、2つの異なる不動点意味論が対応するための大域的な十分条件を自然に与える圏論的枠組みを構築した [4]。特に、確率的遷移システムであるマルコフ連鎖における、部分期待報酬と完全期待報酬という二つの期待報酬が、「ほぼ確実に到達可能」という大域的な性質の下で一一致する現象を抽象化した。部分期待報酬は計算が一般に難しいが、ほぼ確実に到達可能なときはより計算が簡単な完全期待報酬で与えることができる。このような意味論の一一致の背後にある構造を、不動点的観点で明らかにした。

(2) では、形式検証で使われるアルゴリズムや手法の抽象化に取り組んだ。モデル検査アルゴリズム PDR (Property Directed Reachability) は、ハードウェアやソフトウェアの安全性を検証するためのアルゴリズムであり、もともと使うソルバーに依存した複雑な擬似コードで記述されていた。そのため、他のシステムへの拡張が明らかではなく、個別に開発されていた。そこで、様々な拡張が一括で手に入るよう、PDR 群を統合する抽象化を与えた [3]。この抽象化から発展して、PDR が動作するためにシステムに沿った双方向の計算が必要であることを明らかにした [1]。また、確率的システムはこの計算を与えるための構造を持たないことを示し、構造を持つ等価な問題に言い換えることによって、新たな確率的 PDR を提案した。

加えて、システムの振る舞いの等価性を捉える概念である双模倣性についても、その合成性を統一的に扱う枠組みを提案した [5]。双模倣性の合成はシステムによって様々な方法でできるが、それらを統合的に記述できる抽象化はこれまで存在していなかった。この研究では、双模倣性を抽象化する際に用いる余稠密持ち上げという関手を一般化し、これを合成関手にも適用することで、双模倣性の合成性を抽象的に記述した。さらに、この合成性を保証するための十分条件も明らかにした。

現在は、証明論や検証の場面に現れる「大域的性質」に注目し、それらに対する圏論的意味論の構築を目指して研究を進めている。

参考文献

- [1] Mayuko Kori, Flavio Ascari, Filippo Bonchi, Roberto Bruni, Roberta Gori, and Ichiro Hasuo. Exploiting adjoints in property directed reachability analysis. In *CAV (2)*, volume 13965 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 41–63. Springer, 2023.
- [2] Mayuko Kori, Ichiro Hasuo, and Shin-ya Katsumata. Fibrational initial algebra-final coalgebra coincidence over initial algebras: Turning verification witnesses upside down. In *CONCUR*, volume 203 of *LIPICs*, pages 21:1–21:22. Schloss Dagstuhl - Leibniz-Zentrum für Informatik, 2021.
- [3] Mayuko Kori, Natsuki Urabe, Shin-ya Katsumata, Kohei Suenaga, and Ichiro Hasuo. The lattice-

theoretic essence of property directed reachability analysis. In *CAV (1)*, volume 13371 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 235–256. Springer, 2022.

- [4] Mayuko Kori, Kazuki Watanabe, and Jurriaan Rot. Initial algebra correspondence under reachability conditions, 2025.
- [5] Mayuko Kori, Kazuki Watanabe, Jurriaan Rot, and Shin-ya Katsumata. Composing codensity bisimulations. In *LICS*, pages 52:1–52:13. ACM, 2024.